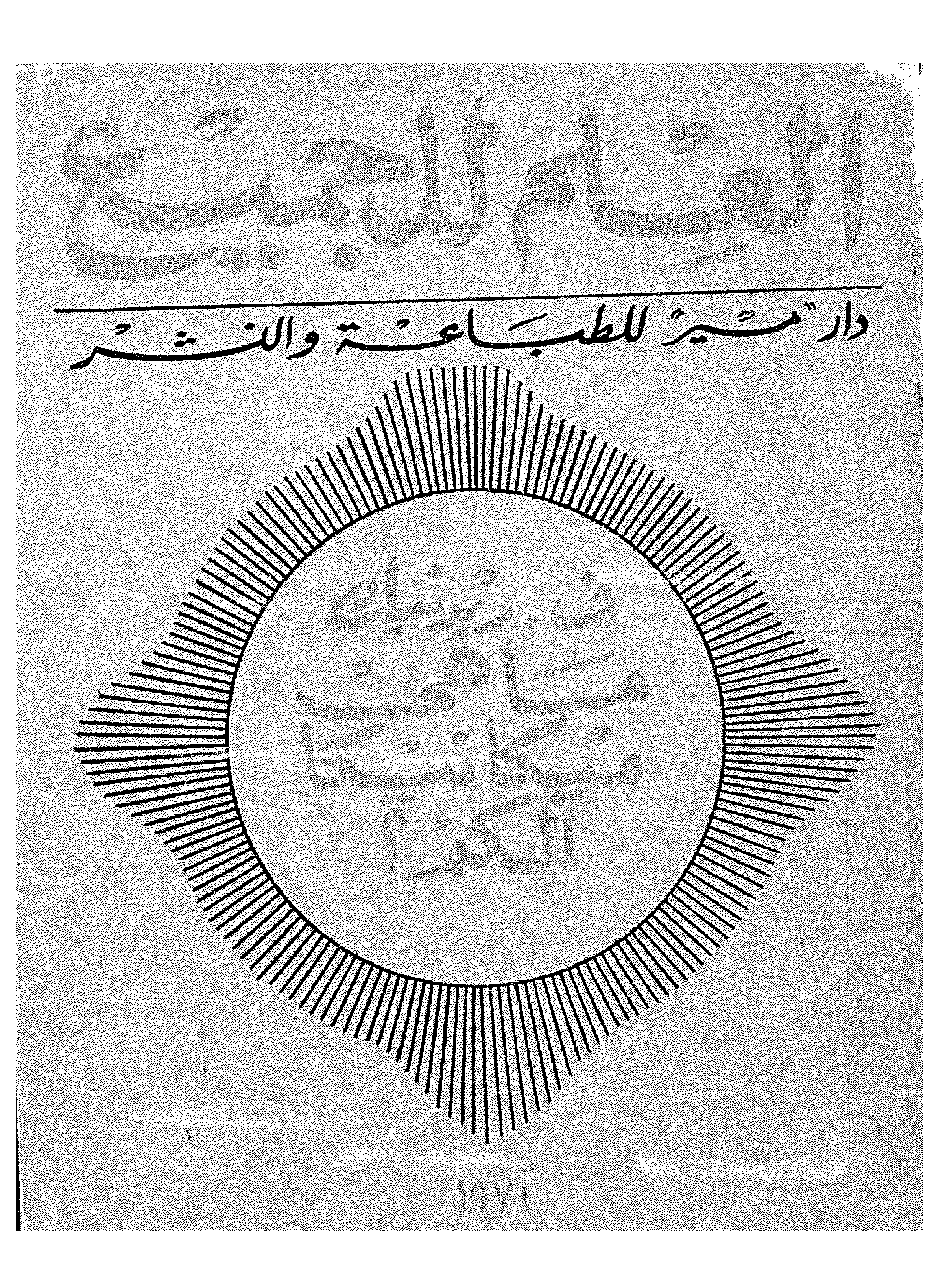

العلم للجميع
دار "مصر" للطباعة والنشر
١٩٧١

اهداءات ٢٠٠٣

أ.د / كمال الدين حسن محمد

القاهرة



دار « مير »

للطباعة والنشر

В. И. РЫДНИК

ЧТО ТАКОЕ КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА

Издательство «Советская Россия»

Москва



دار « مير » للطباعة والنشر

١٩٧١

УДК530.145(023)=927

На арабском языке

تمهيد

دخلت الفيزياء فى اعتاب القرن الحالى عالما جديدا وعجيبا ، هو عالم الذرات ونوى الذرات والجسيمات الاولية الذى لا يرى ولا يسمع . وفى بداية القرن ظهرت الى الوجود نظرية قدمت خدمات جليلة للفيزيائيين طيلة فترة تزيد على الستين عاما ، وتدعى بميكانيكا الكم .

ان السمة العامة لهذا العالم الجديد تختلف كليا عما عهدناه من سمات فى عالمنا . ودرجة الاختلاف كبيرة جدا حتى ان الفيزيائيين عجزوا عن « ايجاد الالفاظ » المناسبة للتعبير عنها ووصفها . ووضعت على عاتق ميكانيكا الكم مهمة اعطاء مفاهيم جديدة حول الجسيمات المتناهية فى الصغر ... وهى مفاهيم تبدو غريبة لاول وهلة ، وتفوق حد التصور .

وغالبا ما تفقد القوانين الاعتيادية عن الطبيعة مفعولها عند محاولة تطبيقها على ظواهر العالم الجديد . اذ تصبح الجسيمات دون ابعاد

وتكتسب صفات الموجات . كما ان الموجات تصبح بدورها مشابهة للجسيمات . وباستطاعة الالكترونات وغيرها من مكونات المادة ان تخترق الحواجز المنيعة ، وقد تزول تماما مخلفة وراءها الفوتونات .

وتقدم ميكانيكا الكم التفسيرات اللازمة لهذه الظواهر العجيبة . ويتضمن كتابنا هذا عرضا لنشوء علم ميكانيكا الكم وتطوره . كما يتناول بالبحث المفاهيم الاساسية لميكانيكا الكم ، وكيف ان هذه النظرية الجديدة كشفت اسرار تركيب الذرات والجزيئات والبلورات ونوى الذرات ، وكيف تعمل ميكانيكا الكم على حل مسألة تتعلق بصفة اساسية من صفات المادة وهى تفاعل الجسيمات فيما بينها ، والعلاقة بين المادة والمجال .

وهذا الكتاب مخصص لاوسع جماهير القراء ، الذين يودون التعمق فى دراسة منجزات الفيزياء الحديثة .

من الميكانيكا الكلاسيكية
الى ميكانيكا الكم

بدلا من المقدمة

الطاقة الذرية .. النظائر المشعة .. اشباه الموصلات .. الجسيمات الاولية .. مولدات الكم . ان هذه التسميات اصبحت شائعة بين الناس هذه الايام . بالرغم من ان اكثرها قدما لم يكتشف الا قبل اقل من ربع قرن من الزمان . وقد ابرزتها الى الوجود فيزياء القرن العشرين .

ان المعارف البشرية تتطور فى عصرنا الراهن بسرعة خيالية . وتتفتح امام البشرية مع ظهور كل انجاز جديد عوالم لم تعرف من قبل .

وتعيش العلوم القديمة مرحلة شباب اخرى . وانطلقت الفيزياء ، تحت سمعنا وبصرنا ، متقدمة الى الامام ، وشغلت مكانة طليعية فى محاولات كشف المجهول . وهى تتقدم فى « هجومها » الكاسح فى جبهة واسعة ، وبسرعة متزايدة ، ولا تبطئ عجلة سيرها الا لتعبئة قواها من اجل القيام بقفزة ظافرة نحو الامام .

وكان لا بد للفيزياء من ان تجد سلاحا قويا يساعدها فى الكشف عن اسرار الطبيعة . وتسنى لها ان تجد هذا السلاح . فنحن نعلم بانه توجد فى ترسانة علم الفيزياء « مدفعية » جبارة ، تتمثل فى التجارب الدقيقة والثابتة بالبراهين ، كما يعمل فى « هيئة اركانها » مئات وآلاف النظريين ، الذين يخططون لها طرق القيام بالعملية الهجومية ، ويخضعون للدراسة والبحث الغنائم التى حصلوا عليها اثناء التجارب . ولا تتم هذه العملية الهجومية على غير هدى . فلدى الفيزيائيين اضواء كاشفة جبارة تنير ساحة المعركة .. وهى النظريات الفيزيائية . وتعتبر نظرية النسبية وميكانيكا الكم من احدث مسقطات الاضواء الكاشفة الموجودة فى حوزة الفيزياء الحديثة .

ان عمر ميكانيكا الكم هو نفس عمر قرننا الحالى الملئ بالاحداث الجسام . ويحدد المؤرخون العلميون هذا التوافق فى السن باعتبار ان يوم ميلاد ميكانيكا الكم هو ١٧ ديسمبر عام ١٩٠٠ . ففى هذا اليوم اعلن العالم الالمانى ماكس بلانك (M. Planck) فى جلسة الجمعية الفيزيائية التابعة لاكاديمية العلوم فى برلين عن محاولته تخطى واحدة من ابرز الصعاب فى نظرية الاشعاع الحرارى .

ان الصعاب التى يلقاها العلم كثيرة . ويعمل العلماء كل يوم ودون كلل من اجل التغلب عليها . الا ان محاولة بلانك كانت فى غاية الاهمية ، وقد حددت مقدما تطور علم الفيزياء لسنوات طويلة .

ونمت شجرة المعرفة الحديثة الجبارة من البذرة الجدية لرؤية

الاشياء التى قال بها بلانك . وولدت من هذه البذرة اكتشافات مذهلة عجز عن تصورها حتى اكثر الكتاب الخياليين فطنة وبداهة . وظهرت من بنات افكار بلانك ميكانيكا الكم التى فتحت ابصار الناس على عوالم جديدة تماما . وكان الانسان لا يدركها الا بصورة غامضة ، كما ان تصوراته عنها كانت اكثر غموضا . وهذه العوالم هى عوالم الاشياء المفرطة فى الصغر من ذرات ونوى الذرات والجسيمات الاولية .

حدود العالم الجديد

هل يصح القول بان الانسان لم يعرف شيئا عن وجود عالم الذرة قبل حلول القرن العشرين ؟ نعم ، كان الانسان يعرف بوجود هذا العالم ، وبتعبير ادق كان يحزر ذلك .

ان العقل الانسانى الذكى يتميز بالقابلية على التأمل والتفكير فى الامور غير المنظورة ، والتنبؤ بالاشياء التى سوف لا تتحقق الا بعد مضى قرون عديدة .

فقد ادرك الانسان منذ الازمنة الغابرة ، وقبل فترة طويلة من رحلات المكتشفين فى دروب عالمنا المجهولة ، بانه يوجد بشر وحيوانات وارض ما وراء العالم المحدود الذى يعيش فيه .

وكان يتحسس وجود عالم الاشياء الدقيقة قبل ان يتفهمه بزمن طويل . ولم تبرز آنئذ ضرورة لشد الرحال الى المسافات البعيدة

من اجل اكتشاف هذا العالم الجديد ، فقد كان فى متناول يده ، ويحيط بالناس ، وفى كافة الاشياء .

ان المسألة التى كانت تشغل بال الحكماء القدامى هى كيف تسنى خلق العالم المحيط بنا ، واحلال مختلف الاشياء فيه ، من شيء لا يرى ولا يبصر . وهل ان الطبيعة تسلك سلوك البناء الذى يبنى البيوت الضخمة من الطوب الصغير ؟ فما هو هذا الطوب ؟

تحطمت الجبال الشامخة بتأثير المياه والرياح والبراكين ذات القوى الخفية ، وتحولت الى قطع من الاحجار . وتفتت الاحجار بدورها ، وبمرور الزمن ، الى قطع صغيرة . وبعد مضى مئات وآلا ف السنين تحولت هذه الاخيرة الى تراب ناعم .

فهل توجد نهاية لتفتت الاشياء ؟ وهل توجد اجسام صغيرة جدا ، الى حد ان الطبيعة لا تقدر على تفتيتها ؟ نعم ، توجد . هذا ما قال به قدماء الفلاسفة مثل ابيقور وديمقريط وغيرهما . واسم هذه الاجسام « الذرات » يعكس صفتها الاساسية ، الا وهى عدم امكان تفتيتها . لان كلمة « الذرة » باليونانية تعنى « غير قابلة للقسمة » .

فما هو شكل الذرة ؟ بقى هذا السؤال معلقا فى الازمنة القديمة دون جواب مقنع . فلربما تكونت الذرات على شكل كرات صلبة لا يمكن النفاذ الى داخلها ، وربما لا ، بل لها شكل آخر تماما .

وكم هو عدد اصنافها ؟ ربما آلا ف ، وربما كان لها شكل واحد .
واعتقد بعض الفلاسفة (مثل الفيلسوف اليونانى ايمبدوكليس — Empedocles) بان اصنافها اربعة على اغلب الظن . وكانوا يقولون بان العالم كله يتكون من اربعة عناصر اساسية : الماء والهواء والارض والنار ، وتتألف هذه العناصر بدورها من ذرات .

وقد يقول قائل من ابناء عصرنا بان هذه المعلومات البسيطة لا يمكن ان تقودنا الى تحقيق التقدم الذى نرجوه .

ربما يكون هذا القائل على حق ، وربما لا . ان اولى خطوات العلم — هى الحركة السريعة على نطاق واسع ، دون التوغل فى العمق . فما اكثر الاشياء التى تحيط بالانسان ! ولا بد لنا من معرفة الوشائج التى تربط ما بين هذه الاشياء ببعضها البعض ، ثم الانتقال بعد ذلك الى مسألة كيفية تكوينها او شكل تركيبها .

كان ظهور فكرة وجود الذرات فى العالم ، فى تلك العصور ، عندما كان العلم لا يزال فى مهده ، يعتبر بالطبع نوعا من الفطنة ونفاذ البصيرة والحدس . ولكنه لم يكن اكثر من حدس ، لم يتأت عن المراقبة والدرس مهما كان شكله ، ولم تثبته التجارب .

ثم نسيت الذرات بعد ذلك فترة طويلة من الزمن .

ولم يتذكرها الباحثون ، وبتعبير اصح ، لم يعودوا الى « تصورها » من جديد الا فى بداية القرن التاسع عشر . ولم يقم بذلك رجال الفيزياء بل الكيميائيون . .

ان بداية القرن التاسع عشر هى فترة من الزمن لا تثير اهتمام المؤرخين عموما فحسب ، بل ومؤرخى العلوم ايضا . فمع هدير مدافع نابليون لم تتغير حدود الدول الاوربية فقط . اذ تغيرت فى المختبرات القليلة العدد التى كانت موجودة آنذاك ، وبشكل حاسم ، تصورات الانسان حول طبيعة الاشياء . تلك التصورات التى بدت من قبل غير قابلة للتغيير ابدا .

اذ وضع يونج فى انجلترا وفرينيل فى فرنسا اسس النظرية الموجية للضوء . بينما وضع آبيل فى النرويج وجالوا فى فرنسا اللبنات الاولى فى الصرح العظيم للجبر الحديث . وبيّن لافوازييه الفرنسى ودالتون الانجليزى باعمالهما بان الكيمياء قادرة على التوغل فى اعماق الاشياء . وقام علماء الكيمياء والفيزياء والرياضيات آنذاك باكتشافات بارزة كثيرة عبدت الطريق لازدهار العلوم الدقيقة على نطاق كبير ، فى النصف الثانى من القرن التاسع عشر .

وطرح عالم انجليزى غير معروف هو بروت (Prout) فى عام ١٨١٥ فرضية حول وجود الجسيمات الدقيقة التى يمكنها ان تساهم فى مختلف التفاعلات الكيمياوية دون ان تتحطم او تستحدث . وهى فرضية الذرات .

وفى تلك السنوات نفسها اكسب العالم الفرنسى الشهير لاجرانج علم الميكانيكا الكلاسيكية شكلا متكاملا وجميلا ، ولكن ليس فيه ــ كما توضح فيما بعد ــ مكانا للذرات .

فى العلم لا يظهر اى شىء من العدم .

ويمكن تسمية ميكانيكا الكمّ بحق بانها وليدة علم الميكانيكا الكلاسيكية ، الذى بدأه « رسميا » العالم نيوتن .

ولكن الحق يقال بانه ليس من العدالة فى شىء منح شرف وضع الميكانيكا الكلاسيكية الى نيوتن وحده . فقد درس الكثير من المفكرين العظام فى عصر النهضة المسائل التى ادرجت فيما بعد كاحد اركان الميكانيكا الكلاسيكية . ومنهم ليوناردو دا فنشى وجاليلو الايطاليان وسيمون ستيفنز الانجليزى وبليز باسكال الفرنسى . وقد كون نيوتن من جميع الابحاث المبعثرة حول الحركة نظرية وحيدة ومنسجمة .

ونحن نعرف حتى يوم الميلاد « الرسمى » للميكانيكا الكلاسيكية . وقد كان ذلك فى عام ١٦٨٧ عندما نشر فى لندن كتاب « الاسس الرياضية للفلسفة الطبيعية » . وكانت العلوم الطبيعية تسمى فى تلك الازمنة بالفلسفة .

وقد صاغ نيوتن فى كتابه هذا للمرة الأولى الموضوعات الرئيسية الثلاثة حول الميكانيكا الكلاسيكية ، والتى اصبحت تعرف فيما بعد باسم قوانين نيوتن الثلاثة . ويعرفها اليوم جميع تلاميذ المدارس .

ان صرح الميكانيكا الذى بناه نيوتن اوسع بكثير من هذه القوانين الثلاثة ، وقد اكمل بناؤه بشكل تام منذ مدة طويلة جدا . ويمكننا اليوم مشاهدته من قمم العلم الحديث .

ولم تكن هناك اية حركة ابدا فى الفضاء الخالى الهائل المليء بعدد كبير من مختلف الاجسام ابتداء من الكواكب العظيمة الى اصغر دقائق الغبار . وكان العالم كله فى حالة سكون تام .

وبعد ذلك وما ان اكتسبت جميع الاجسام فى العالم القابلية على الحركة بفعل الارادة الآلهية حتى أخذت تواصل الحركة وبدأت تؤثر الواحدة فى الاخرى بموجب قوانين معينة . وعدد هذه القوانين كبير ، ولكن يمكن حصرها فى نهاية الامر بمجموعة قوانين اساسية منها قوانين نيوتن .

وابتداء من تلك اللحظة انعدمت المصادفات من العالم كلية . فكل شيء يحدد مسبقا . واصبح تصرف الاقدار الفوضوى امرا مستحيلا . ومنذ ذلك الحين ساد الانسجام التام فى عزف الحان سيمفونية الكون .

وبعد نيوتن بحوالى اكثر من قرن جلبت اسمى آيات الرضى والارتياح الى نفوس الفيزياثيين رؤ ية الانسجام المطلق الذى يسود العالم القائم على قوانين نيوتن فى الميكانيكا . وكانوا يطمئنون فى كل مرة يجدون فيها ان جزءا من الكون يفسر فى اطار هذه النظرية . وسمحت الطبيعة لفترة طويلة بمعاملتها على هذه الصورة .

على أن ذلك لم يدم طويلا . فقد ايقن العلماء بانه ليس هناك اقل ثباتا من الحقائق الجامدة القاطعة (الدوجما) . وبدأت بالظهور حقائق ، وبحتمية لا مفرمنها ، أبت الدخول ضمن الاطر المرسومة لها .

وفي اواخر القرن التاسع عشر نشبت ازمة ميكانيكا نيوتن . واتضح شيئا فشيئا بان هذه الازمة تعني سقوط فكرة الجبرية (التحديد المسبق) للعالم ، والمعروفة علميا باسم مبدأ الجبرية الميكانيكية (mechanical determinism). وبدا كل شيء في العالم ليس بسيطا الى هذا الحد ، وليس باقيا على حاله الى الابد .

ولم تجلب ميكانيكا الكم ادراكا جديدا للعالم فحسب ، بل وطرحت تفسيرا جديدا تماما للظواهر فيه . ولاول مرة ترك المجال مفتوحا لدخول عنصر الصدفة في العلم بصورة تامة .

وربما لا يقع الذنب على عاتق الفيزيائيين في كونهم وقفوا حيارى امام هذا الضيف غير المتوقع . لكن الذي حدث هو فقط انهيار فكرة الجبرية الخالدة التي ابتدعوها بانفسهم . الا ان الفيزيائيين ظنوا بانه قد انهار اى تحديد مسبق (جبرية) عموما ، وان العالم تسوده الفوضى المطلقة ، وان الاشياء لا تخضع لاية قوانين ثابتة .

ومضت فترة طويلة من الزمن قبل ان يخرج علم الفيزياء من الهوة السحيقة لهذه الازمة :

انهيار المعبد

يقول المثل : لقد اودى بحياة القطة فضولها ...

ان هذا المثل ينطبق على النظريات ايضا ، حتى لو بدا انها صحيحة تماما ، وقابلة للتفسير .

تولد النظرية فى مرحلة معينة من تطور العلم لدى دراسة عدد كبير من الظواهر . وهدف النظرية شرح الظواهر تلك من وجهة نظر معينة .

لكن هذه النظرية بالذات تبدو غير كافية ، بل وغير صحيحة ، عند اكتشاف حقائق جديدة لا تدخل ضمن نطاق القوالب النظرية القديمة التى لا تتسع لها .

وكانت الفيزياء الكلاسيكية تفى بالغرض تماما عندما كانت حدود الفيزياء لا تتعدى الميكانيكا فحسب ، غير ان القرن التاسع عشر قد شهد هجوم الفيزياء العاصف فى جبهة عريضة واسعة من الظواهر الجديدة . فبدأت بالنمو بسرعة فروع الفيزياء الخاصة بدراسة العمليات الحرارية ــ الثرموديناميكا ، والظواهر الضوئية ــ علم البصريات ، والظواهر الكهرومغناطيسية ــ الكهروديناميكا . وبدا كل شيء على ما يرام فى الفيزياء لفترة ما من الزمن . ودخلت الظواهر المكتشفة حديثا بهدوء داخل الاطر المحددة لها .

ومع ذلك فخلال بناء صرح الفيزياء الكلاسيكية كان التصدع يصيب واجهته الواسعة فى احيان كثيرة . وتجلى بوضوح ان هذا الصرح يهتز تحت ضربات الحقائق الجديدة .

ومن هذه الحقائق الهامة ثبات سرعة الضوء العجيب . وقد بينت ادق التجارب واكثرها موضوعية بان سلوك الضوء يختلف بصورة جذرية عما كان يدرس من الظواهر المعروفة آنذاك .

وعمد الفيزيائيون من اجل تطبيق سلوك الضوء هذا على قوانين الفيزياء الكلاسيكية ، الى ابتداع وسط ما اطلقوا عليه اسم « الاثير » ، له خصائص عجيبة تماما من وجهة نظر الفيزياء الكلاسيكية نفسها . وسنتحدث عن الاثير فيما بعد بالتفصيل . الا ان الاثير لم يستطع فى الواقع انقاذ الفيزياء القديمة .

وكانت العقبة الرئيسية الاخرى امام الفيزياء الكلاسيكية الاشعاعات الحرارية للاجسام الساخنة .

واخيرا تم اكتشاف النشاط الاشعاعى « الهوة العميقة » التى وجب على الفيزياء الكلاسيكية اكتشاف اغوارها فى سنوات سيادتها المطلقة . لان العمليات الغامضة للنشاط الاشعاعى لم تؤد الى تحطيم نواة الذرة فحسب ، بل ونسفت الموضوعات الاساسية للفيزياء التى بدت واضحة كليا من وجهة نظر المنطق السليم . ونمت بسرعة نتيجة تصدع صرح الفيزياء نظريتان جديدتان هما : نظرية النسبية ونظرية الكم .

حول اسم النظرية الجديدة

هكذا ولدت ميكانيكا الكم فى اعتاب القرن العشرين .

وقبل كل شيء ، لم اطلق عليها هذا الاسم ؟ الحقيقة ، ان هذه التسمية لا تعكس جيدا محتوى الاشياء التى تتناولها ميكانيكا الكم بالبحث .

ولكن لابد من الاعتراف بان عدم الدقة فى وضع المصطلحات صفة تميز اكثر من فرع فى علم الفيزياء . وهناك اسباب كثيرة لذلك ذات طابع تاريخى فى الاساس .

وعلى سبيل المثال ، تكفينا الاشارة الى الاختلاف الكبير فى تسمية « القوى » . فغالبيتها لا تملك اية علاقة ابدا بالقوة بمعناها الخاص . وهناك مثال قوة الحصان (وهى ليست قوة بل قدرة !) ، وهناك « القوة الحية » (وهى طاقة كينماتيكية) ، وهناك قوة التيار ، وقوة الضوء اى شدته ، وكثير غيرها من « القوى » .

ويتخلص علم الفيزياء من هذا الغموض فى الاصطلاحات تدريجيا . ومع ذلك فان هذه العملية تجرى بصورة بطيئة جدا .

وقد حدث نفس الشيء لدى اطلاق تسمية « ميكانيكا الكم » . فاولا ، لم هى ميكانيكا ؟ فليس فى النظرية الجديدة اى شيء ميكانيكى ، بل والادهى من ذلك ، كما سنرى فيما بعد ، انه من المستحيل وجود ذلك . والتبرير الوحيد للامر هو ان لفظة « الميكانيكا » تستخدم

هنا بمعناها العام . فعندما نقول ، مثلا ، « ان التركيب الميكانيكى لهذه الساعة جيد » او « التركيب الميكانيكى للدولة » فاننا نقصد بذلك التركيب او مبدأ العمل . ومن المفضل أخذ مفهوم ميكانيكا الكم انطلاقا من التحديد الواسع لعلم الفيزياء نفسه .

وثانيا ، لماذا — ميكانيكا الكم ؟ ان لفظة الكم ، وهى باللاتينية « كوانت — quantum — » تعنى « وجبة » او « كمية » . والعلم الجديد كما سنرى فيما بعد هو فى الواقع يؤكد فى احد اسسه على صفات « الكمية » فى العالم المحيط بنا . صحيح اننا نفضل الحديث لا عن « كمية » هذه الصفات بل عن « تقطعها » (discreteness) . ومن الناحية الاخرى ، فكما سنرى ان هذا التقطع ليس ظاهرة عامة مطلقا ، ولا يحدث دائما او فى اى مكان .

وبالاضافة الى ذلك فانها تمثل جانبا واحدا من المسألة . فمما لا يقل غرابة عن ذلك ازدواج صفات المادة . ويظهر هنا الازدواج فى الاتحاد الخالد لصفات الجسيمات وصفات الموجات فى مادة واحدة .

وقد جرى تصحيح تسمية هذا العلم الى « ميكانيكا الموجات » . ولكن فى هذه التسمية ايضا ينعكس « نصف » محتوى هذا العلم ايضا ، فليس فيها اى ذكر للكمات .

وهكذا فان جميع تسميات هذه النظرية الفيزيائية الجديدة لا تفى بالغرض . وهل يعقل بانه من المستحيل ايجاد تسمية اخرى تطابق المحتوى بدرجة أفضل ؟

ان ادخال المصطلحات الجديدة فى العلوم من الامور المتعبة والتى لا تبعث على الامتنان . وهى تدخل فى مجال العلم ببطء ، كما انها تتغير بشكل اكثر بطئا . ويفهم علماء الفيزياء المحتوى الجديد الذى تتضمنه . اما مهمتنا فهى دراسة هذا المحتوى .

علماء الفيزياء يضعون التصاميم

هل يمكنك ان تتصور بسهولة مسيرة كرة تدور فوق حبل تحركه بيدك فوق رأسك ؟ طبعا ، نعم .

ومن المضحك الحديث هنا حتى عن فكرة التصور . اذ يمكن مشاهدة حركة الكرة بالعين المجردة . وقد ولدت الفيزياء الكلاسيكية من مراقبة الاشياء المحيطة بنا والظواهر المتعلقة بها مباشرة .

اذا رميت كرة فوق طاولة افقية ملساء فانها تواصل الحركة حتى بعد ان توقف تأثير يدك عليها ، اى بعد انتهاء تأثير القوة . ومن هذه الملاحظة وغيرها استنبط قانون القصور الذاتى ، الذى حدده نيوتن فيما بعد باعتباره قانونه الاول فى الميكانيكا .

والكرة لا تبدأ الحركة قبل ان تدفعها بيدك ، او تضربها بكرة اخرى . ان حركة الكرة فوق الطاولة الملساء ثم توقفها لهما صفة مشتركة ، هى انه فى الحالتين لم تؤثر على الكرة اية قوى خارجية .

وعند ادارة الكرة فوق الحبل تؤثر عليها طيلة الوقت قوة ما ، تبعدها عن السير فى اتجاه مستقيم كما فى حالة الحركة الحرة .

وعندما تكون نفس هذه الكرة موضوعة فوق الطاولة فانها تخرج من حالة السكون تحت تأثير قوة اليد وتكتسب سرعة تزداد بازدياد تأثير القوة المسلطة عليها . وولد من هذه الملاحظة قانون نيوتن الثانى .

ولكن ليترك الباحث ــ وهو نيوتن فى هذه الحالة ايضا ــ حدود عالمنا اليوم ، ويبدأ بمراقبة السماوات والبحث عن سر « الانسجام فى الاجرام السماوية » الذى استعصى على الفلاسفة القدماء . فما الذى يجعل الكواكب تتحرك حول الشمس بهذه الصورة لا غيرها ؟

ان كلمة « الانسجام » نفسها تعنى شيئا من الانتظام وتأثير قانون ما يتحكم فى حركة الاجرام السماوية . ولكن الحديث عن هذه « الاجرام » غير وارد هنا طبعا . الا ان القانون الذى تدور بموجبه الكواكب ، ومنها الارض ، حول الشمس ، والاقمار التابعة حول الكواكب ، هو قانون قائم بلا شك .

وهنا ربما يتذكر العالم الكرة الدائرة على الحبل . ان حركة الكواكب تشبه فى الواقع الحركة المنتظمة للكرة ، الا انها تتم بسرعة ابطأ بكثير ، كما لا يوجد هناك اى حبل طبعا . وهذا يعنى انه اذا ما اثرت فى الحالة الاولى قوة ما فانها لا بد وان تؤثر فى الحالة الثانية .

ومن المستحيل طبعا تحسس تأثير القوة ، التى تتحكم فى حركة الكوكب : فهى ليست حبلا يمسك باليد ، ونحن نعرف بانها قوة الجذب المتبادل بين الاجسام . وان عبقرية نيوتن وذهنه الثاقب يتجليان فى اكتشاف العلاقة المشتركة بين حركة الكرة ودوران الكواكب .

ولكن ما يهمنا هنا هو شيء آخر . فان الكرة الدائرة على الحبل تعتبر واحدة من اولى النماذج الفيزيائية . ويتم ادراك ظاهرة طبيعية هائلة كحركة الكوكب بدراسة ظاهرة اخرى على نطاق اصغر بكثير جدا . وطبعا بتكوين افتراض جرىء هو ان كلتا الظاهرتين تخضعان لقوانين متشابهة .

فهل يمكن اتباع نفس هذا الاسلوب دوما وفى كل مكان ؟ وهل من الصحيح تطبيق قوانين ظاهرة ما على اخرى اكبر او اصغر منها الى حد كبير من حيث النطاق ؟

لو وجه هذا السؤال لاحد ما ايام نيوتن لكان الجواب فى منتهى البساطة . وانه بما ان المراقبة قد اثبتت صحة حدوث ظاهرة كبيرة ما على اساس حسابها اعتمادا على ظاهرة اصغر منها ، او بالعكس ، فان هذا الافتراض صحيح ، وكل شيء على ما يرام .

ويمكن سماع نفس هذا الجواب حتى فى ايامنا هذه . ولكنه ينظر طبعا من زاوية اخرى . فاولا لقد اعتبر نيوتن بان الكون واحد، وثانيا ، ان القوانين التى تتحكم فى الحياة فيه سواء اكانت فى العالم الاعتيادى بالنسبة للانسان او لعالم النجوم والكواكب هى قوانين واحدة .

ونحن نتفق مع النقطة الاولى كليا معتمدين على ما بلغه العلم الحديث من مستويات رفيعة .

اما عن النقطة الثانية .. فمن الطبيعى اننا لا نستطيع استنتاج

انه لا بد من تشابه العوامل الداخلية المؤدية الى حدوث ظاهرة مع العوامل الداخلية لظاهرة اخرى لها نفس المظاهر الخارجية .

ان الببغاء تردد اقوال الانسان . لكن من السذاجة جدا القول بان الببغاء يفكر فى الكلام قبل ان يردده !

وان مجمل التعقيد فى الادراك ناجم عن وجود قوانين مختلفة تماما فى سلطة عوالم الاشياء ـــ الدقيقة جدا ، والاعتيادية ، والكبيرة جدا ـــ ، ولا يمكن تطبيق قوانين العالم الاعتيادية على عوالم ذات نطاق اكبر الا ضمن قدر محدود .

وتفسر خيبة الكثيرين من علماء الفيزياء لدى مصادفتهم الجسيمات الدقيقة العنيدة المذكورة ، بانها نتيجة لعدم تفهمهم هذا الاستنتاج الهام . وعندما ثبت لهؤلاء العلماء بان الجسيمات الدقيقة ترفض الدخول فى دائرة المفاهيم المعترف بها أخذوا يتحدثون عن الفوضى وانعدام القوانين فى الطبيعة . ومما لا شك فيه ، وكما سنرى ، فان ذلك بعيد عن الواقع .

وقد لعبت التصورات النموذجية ولا تزال دورا عظيما فى تطور العلوم الطبيعية . وتمت اكتشافات كبيرة بمعونة النماذج التى صنعتها يد الانسان او الموجودة فى ذهنه فقط لاستحالة تحقيقها .

ان الكرة الدائرة على الحبل هو مثال بسيط جدا على ذلك . وبمرور الزمن اصبحت النماذج التى يستخدمها علماء الفيزياء اكثر تعقيدا وغرابة . ولكن مهما كانت غرابة هذه النماذج فانها تتميز

جميعا بصفة مشتركة واحدة . وهى انها تصنع من المواد الاعتيادية للعالم المحيط بنا ، الذى نراه باعيننا ونحسه بايدينا .

وهذه هى طبيعة العقل الانسانى . فهو ينطلق دائما من الواقع فى تصوير اكثر الاشياء تجريدا وخيالا وتعميما .

لا يمكن عمل نموذج لكل شيء !

منذ نهاية القرن التاسع عشر أخذت طرق البحث باستخدام النماذج لظواهر الطبيعة الجديدة تلقى الفشل تلو الآخر . وهذا ما حدث ، مثلا، لدى افتراض نموذج الاثير . فقد كان عليه ، حسب تفكير واضعيه ، ان يلعب دور طوق النجاة للفيزياء الكلاسيكية التى « على وشك الغرق » ، بعد ان اصبحت عاجزة عن تفسير ثبات سرعة الضوء بشكل عجيب .

فكيف تبدو صورة الاثير ؟ فهو شيء صلب للغاية وفى الوقت نفسه شفاف للغاية . وهو يذكرنا نوعا ما بالزجاج غير القابل للكسر . ومع ذلك وبرغم صلابة الاثير فيمكن للاجسام المختلفة ان تتحرك فيه دون ان يعوقها اى عائق ابدا . والاكثر من ذلك فانها يمكن ان تجذب الاثير خلفها فى حركتها مولدة « ريحا » اثيرية . وهذه الريح ارق واعذب من « نسيم الليل » .

وحاول علماء الفيزياء خلال سنوات عديدة ادراك وفهم خصائص الاثير الخيالية الى ابعد الحدود ، لكنهم فشلوا فى تحقيق ذلك . فقد

تبين بان الاثير هو ، حقا ، ضرب من الخيال ، وليس له اساس فى الواقع .

وقد حدث ذلك لا مع فرضية الاثير وحدها . فلم تستطع فرضيات (نماذج) الفيزياء الكلاسيكية جميعها اعطاء تفسير لتوليد الطاقة الغامضة من قبل اليورانيوم والراديوم وغيرهما من العناصر الكيمياوية الاخرى - وهو اشعاع الطاقة باستمرار ودون انقطاع خلال الا ف وملايين السنين دون وجود مصدر خارجى .

كما ان فرضية اينشتين حول الفوتونات وجهت ضربة اخرى ضد التصورات القديمة عن النماذج . وسنتناولها بالشرح بالتفصيل فيما بعد . ومع ذلك فلا يزال من الممكن ، ورغم التعقيد ، تصور الضوء كمجموعة من الموجات الكهرومغناطيسية ، التى تنتشر من مصدرها الى مختلف الاتجاهات .

وقد اعتدنا على اعتبار الموجة دائما كحركة وسط من الاشياء . فمثلا قد يكون هذا الوسط مياه البحار ، او الهواء بالنسبة للموجات الهوائية . ولكن الموجات الكهرو مغناطيسية قد تنتشر فى الفراغ المطلق !

وبهذا المفهوم من السهل تصوير الضوء على انه تيار من جسيمات الضوء الدقيقة ، كما افترض نيوتن . وتولد هذه الجسيمات دقائق وهاجة ، فتطير الى مختلف الاتجاهات ، وعندما تسقط فى العين تؤدى الى اثارة الاعصاب البصرية وتولد الشعور بوجود الضوء .

ويمكننا هنا ان نتصور بدون صعوبة كيف تطير هذه الدقائق في الفراغ .

ولكننا لا نستطيع ان نتصور الضوء بحيث تكون له في آن واحد صفات الموجات والجسيمات كما أكد ذلك اينشتين .

ويمكننا مع ذلك مشاهدة صورة واضحة للنموذج الاول للذرة الذى صنعه بوهر ورذرفورد . فهناك جسيمات صغيرة جدا هى الالكترونات تدور فى مدارات معينة حول نواة بنفس الصغر . ومقاييس هذه المدارات تزيد بعشرات الا ف المرات عن مقاييس حجوم الالكترونات والنوى .

واذا ما شحذنا خيالنا فيمكننا ان نتصور التركيب « الفراغى » للذرة هذا . فاننا نحن نعيش فى نظام كوكبى ، مقاييس حجوم « الكتروناته » — الكواكب — يقل الا ف المرات عن مقاييس حجوم مداراتها حول « النواة » — الشمس .

ولكن بعد مضى عدة سنوات احدث دى برويل (de Broglie) بلبلة شاملة فى هذا التصور . اذ قال بان الالكترونات والنوى وجميع « مكونات » عالمنا بشكل عام لها نفس صفة الازدواج التى طرحها اينشتين حول الفوتونات ، اى ان لها صفات الموجات والجسيمات في آن واحد . وكان من نتيجة ذلك ان اصبح من المستحيل تصور جسيمات المادة ، كما كان الامر فى جسيمات الضوء .

عالم لا يلمس ولا يرى

اصبح عمل الفيزيائيين صعبا . وكانوا سابقا يسيرون فى الدروب المؤدية الى العالم الجديد ، عارفين مقدما ، بان هذا العالم لا يختلف عن العالم الاعتيادى الا فى التفاصيل ، لا فى الجوهر . فاذا بهم يصبحون فى نفس وضع الرحالة القدماء الذين كانوا يخافون الرحلات البعيدة وتوقع حدوث لقاءات مروعة مع المخلوقات الرهيبة التى نصفها وحش ونصفها الآخر انسان . فليس هناك حدود للخيال الفزع !

ولكن وضع علماء الفيزياء كان اسوأ حتى من وضع اولئك الرحالة ، لان الاخيرين كانوا دوما يجدون خيبة أمل « سعيدة » عندما يلتقون باناس عاديين مثلهم ، ويشاهدون نفس الارض والجبال والبحار ، ولكن فى نسق جديد . لكن علماء الفيزياء وجدوا فى العالم الجديد اشياء « رهيبة » تعجز الكلمات عن تسميتها . ولكن ما قيمة التسميات ! ان الخيال عاجز عن تصور غرابة عالم الذرات الجديد !

غير ان العلم المتطور كان يتطلب طرح مثل هذه التصورات على غرابتها . وكان من الصعب تكوين ميكانيكا الكم ، الا ان ايجادها كان ضروريا .

ولا جدال فى انه من السهل جدا تكوين نظرية ما اذا ما وجد المرء امامه نماذج واضحة على غرار ما هو موجود فى العالم المحيط .

ولكن اذا ما كان عالم الجسيمات المتناهية فى الصغر مبينا بشكل لا يمكن تشبيهه باية نماذج مماثلة ؟ هل يعنى ذلك ان نقف مكتوفى الايدى وان نستسلم ؟

كلا ! اذا كان مستحيلا تصور نماذج واضحة ، فهذا يعنى اننا يجب ان نعمل مع نماذج غامضة . ومضت سنوات قليلة ، فاصبحت هذه النماذج « واضحة » الى درجة كبيرة ، وأخذ علماء الفيزياء يثمنونها الى حد انهم لا يستطيعون الاستغناء عنها . وياللاسف! فبمرور الزمن — اذا ما واصلنا السير فى هذا الاتجاه سيحين الوقت الذى سيستغنى فيها عن هذه النماذج ، وتستبدل باخرى اكثر غرابة من الصعب استيعابها . ولكن ما العمل ، فهذا هو قانون تطور العلوم .

وفى هذا بالذات تكمن المأثرة العظمى لفيزيائيى هذا القرن : اذ استطاعوا الوصول الى هدفهم عبر متاهة التجريدات والنماذج الغريبة عما ألفناه من اشياء ، كما استطاعوا وضع نظرية بعيدة المنال حول العالم الجديد للجسيمات المتناهية فى الصغر . والاكثر من ذلك ان الفيزيائيين استطاعوا بالاعتماد على هذه النظرية الوصول الى انجازات اعظم فى كل تاريخ البشرية . فكشفوا سر الطاقة النووية ، الجنى الذى بقى حبيسا فى قمقمه طيلة قرون عديدة دون ان يثير اى اهتمام .

نعم ، ان تحقيق استخدام الطاقة الذرية والالكترونيات كان سيبقى مستحيلا بدون ميكانيكا الكم .

صعب ولكن هام

ان طبيعة ميكانيكا الكم غير العادية جعلت فهمها صعبا . والحقيقة ان جزءا « من الذنب » فى ذلك يقع على عاتق ميكانيكا الكم نفسها . وسبب ذلك لا يعود الى ان مداها يتسع باستمرار ، كما ان اساليبها تزداد كمالا . لكن الكتابة عن نظرية متنامية ، وبمثل هذه السرعة اصعب بكثير من الكتابة عن النظريات التى ارسيت اركانها . ولا يتوقف الامر عند هذا الحد ، فهناك من بين اوساط الفيزيائيين من يواصل حتى يومنا هذا المناقشات الحادة حول فكرة ميكانيكا الكم ، وعن اى مجالات عالم الجسيمات المتناهية فى الصغر تتناولها هذه النظرية بالبحث .

دخلت الانسانية عصر الفضاء . ويحتاج الافراد فى تعلم « قواعد السلوك » فى الفضاء الى معرفة علم الفيزياء بصورة ممتازة . وتختلف فيزياء الفضاء الكونى بشكل حاد عن الفيزياء « الارضية » فى كون اهم جانب فيها هو عالم الأشياء المتناهية فى الصغر .

وتتأكد فى الفضاء على نطاق واسع الفكرة القديمة من ان الصغير والكبير يلتقيان . فالكواكب الهائلة والذرات الدقيقة لا تلتقى فحسب ، بل وتكون وحدة واحدة .

من الصعب ، بل ومن المستحيل ، الكتابة بشكل مبسط عن علم ما بدون وجود تصورات واضحة عنه . لذلك فاننا فى الحديث

عن ميكانيكا الكم ، سنستخدم التشبيهات ، اذا تعذر استخدام النماذج ، للظواهر المألوفة لدينا فى الطبيعة . الا انه ليس لهذه التشبيهات فكرة عميقة او دقيقة الى حدّما . فكل ما فى الامر انها تساعد على الفهم .

وعلى سبيل المثال ، كما سنرى ، فان العبارة « الالكترون يدور حول نواة الذرة » ليس لها اى معنى فى واقع الامر ، فهى كالكلمات التالية اذا ما قيلت لساكن المناطق الاستوائية « الثلج هو شيء ابيض كالملح يتساقط من السماء » . وان حركة الالكترون فى الذرة ، وجوهر الالكترون نفسه هو اكثر تعقيدا مما نتصوره او نعرفه عنهما اليوم . وليس اليوم فقط ، بل وحتى غدا ، وبعد مضى الف عام !

والواقع ان تطور ميكانيكا الكم يؤكد الفكرة حول الاختلاف الذى ليس له حدود فى اشكال الالكترون ، وعلى صفاته الحقيقية التى لا تنتهى ! ولكن هل يقتصر ذلك على الالكترون فحسب ؟

اننا لا نعرف اليوم بعد الطبيعة المحيطة بنا مباشرة بصورة جيدة . فنحن فقط نبدأ الآن فى التوغل بصورة حقيقية داخل قشرة الارض والمحيط والجو ، ونحن نبدأ الآن فقط فى ادراك حياة الحقول والغابات والجبال والانهار والصحارى .

فهل بالامكان المطالبة بمعرفة عالم ليس هناك ما هو اكثر منه صعوبة من العوالم ، وهو عالم الذرات ونوى الذرة والجسيمات

الاولية ! ويكفى العلم من اجل هذا العمل باقصى طاقة لمئات وآلاف السنين . اما الآن فنحن نقف عند منابع نهر المعرفة الجبار فقط .

ولكن ما اكثر الظواهر العجيبة التى تتكشف امام انظار الباحثين فى هذا العالم الذى اكتشف منذ فترة وجيزة ! وما الآفاق الملهمة ، والخيالية بحق ، التى افتتحها العلم الجديد امام التكنولوجيا والصناعة والزراعة والطب .

ان المحطات الكهربائية الذرية .. النظائر المشعة .. البطاريات الشمسية ... هى عدد قليل من تلك الآفاق . اننا على اعتاب عصر تحرير الطاقة النووية لاستخدامها فى الاغراض السلمية وغزو الفضاء بصورة حاسمة ... وان كل تلك الانجازات العظيمة للحاضر النير والمستقبل المذهل فى القرن الحالى هى من ثمرات البذرة الصغيرة التى القاها ماكس بلانك قبل ستين عاما مضت فوق التربة الخصبة للمعرفة العلمية ، ورعتها كوكبة من العلماء البارزين .

الخطوات الاولى للنظرية الجديدة

الحرارة والضوء

شيء جميل حقا ان نجلس فى امسيات الشتاء بالقرب من الموقد الدافئ ونستمع الى طرطشة السنة اللهب المتصاعدة مع الدخان ...

ولكن لماذا نشعر بالدفئ قرب الموقد ؟ ويمكن للمرء ان يتحسس وجود الموقد على مسافة عدة امتار ، حتى دون ان يرى النار التى تضيئ الغرفة بنور مرتعش مريح .

يبعث الموقد بالاضافة الى النور بعض الاشعاعات غير المنظورة التى تولد الدفء فى الغرفة . وتسمى بالاشعاعات الحرارية او ما فوق الحمراء . واذا ما تطلعنا الى العالم المحيط بنا لادركنا بان الاشعاع الحرارى ينتشر فى الطبيعة على نطاق واسع جدا . فتنبعث الاشعاعات الحرارية والضوئية من الشمعة الصغيرة وشعلة النار الكبيرة والشمس العظيمة . وحتى النجوم البعيدة جدا ترسل اشعتها الحرارية الى الارض .

واذا انبعث ضوء من الجسم المسخن فانه يولد حتما اشعاعات حرارية . وانبعاث اشعاعات الضوء والحرارة عملية موحدة . ولهذا السبب اطلق العلماء على جميع اشعاعات الاجسام الناجمة عن

التسخين اسم الاشعاعات الحرارية ، سواء اكانت اشعاعات ضوئية او حرارية بالذات .

وقد اشار علماء الفيزياء منذ القرن الماضى الى القوانين الاساسية فى الاشعاع الحرارى . وهى ليست بالجديدة على القارئ . وسنذكر اثنين منها .

فاولا ، كلما ازداد تسخين الجسم ، كلما ازداد سطوعه . وتختلف كمية الاشعاعات المنبعثة منه فى كل ثانية بشكل حاد جدا باختلاف درجة حرارته . واذا ما رفعنا درجة الحرارة فى هذا الجسم بمقدار ثلاثة اضعاف فقط ، فان كمية الاشعاعات المنبعثة منه ستزداد بشدة بمقدار مائة مرة تقريبا !

وثانيا ، يتغير لون توهج الجسم بازدياد درجة حرارته . فانظر مثلا الى قطعة من ماسورة حديدية وضعت فوق لهب موقد اللحام . فتكون اول الامر ذات لون معتم تماما ، ثم يظهر وهج احمر خفيف سرعان ما يميل الى اللون القرمزى الشديد ثم البرتقالى والاصفر . واخيرا تبدأ قطعة الماسورة المسخنة بتوليد وهج أبيض .

ويستطيع سباك الصلب المجرب ان يحدد بدقة درجة حرارة الماسورة الحديدية المتوهجة اعتمادا على لون التوهج . فيقول مثلا عند مشاهدته اللون القرمزى بان درجة الحرارة تبلغ حوالى ٥٠٠°م ، وعندما يكون لون الوهج اصفر ان درجة الحرارة حوالى ٨٠٠°م ، بينما يشير اللون الا بيض الى ان درجة الحرارة تزيد عن ١٠٠٠°م .

الا ان علماء الفيزياء لا يقنعون بهذا الوصف الكيفى للظاهرة فقط ، وبمجرد النظر ، فهم يحتاجون الى الارقام المضبوطة . فعندما يقرأ العالم الفيزيائى فى سجل التجارب عبارة « كان الطقس اليوم باردا » فانه لا يفهم منها شيئا قدر ما يفهم اى انسان آخر عبارة « كان وجهه مستديرا » لان الانسان يريد ان يقدم له وصفا للملامح المميزة لهذا الوجه ... والانف والشفتين والجبهة .

وقد صادفت علماء الفيزياء اجسام وحالات كثيرة مختلفة انبعثت خلالها الاشعاعات الحرارية . الا ان هذه الحالات الكثيرة لم تقنعهم ابدا . فكانوا يحتاجون الى جسم « قياسى » يضعون على اساسه قوانين الاشعاع فى الاجسام الساخنة بسهولة اكبر . وعندها لاستطاعوا اعتبار انبعاث الاشعاع الضوئى من الاجسام الاخرى كشذوذ عن الحالة « القياسية » . وقد يبدو للقارئ غريبا طبعا الوصف التالى : « كان أنف الشخص اطول من الانف القياسى ، عيناه اكثر اخضرارا من المعتاد ، الا ان المقاييس اقل من المعدل » . بينما يقابل الفيزيائى مثل هذا الوصف بالارتياح الكبير . واليكم السبب .

اكثر سوادا من الاسود

حاول جمع عدة اشياء ذات لون واحد قدر الامكان . ثم ضعها اما ناظريك ، وحاول ايجاد الاختلاف فيما بينها فى اللون .

ولكن اذا ما امعنت النظر فتستطيع ملاحظة الفرق . وسيكون

لاحد الاجسام مثلا لون فاقع ، بينما لون الآخر بالعكس عميقا واكثر غنى .

ويتوقف هذا الاختلاف على كمية ما يمتصه الجسم من الضوء الساقط عليه ، وكمية ما يعكسه منه . وتتغير النسبة بين هاتين الكميتين في حدود واسعة . واليكم حالتان متناقضتان كليا ، وهما سطح فلز لامع وقطعة قطيفة سوداء . فالفلز يعكس جميع الضوء الساقط عليه تقريبا ، بينما تمتص القطيفة جميع هذا الضوء تقريبا ، ولا ينعكس منه شيء تقريبا .

ويستفيد السحرة من خاصية القطيفة هذه الى أقصى حد ، فهى لا ترى عمليا . فالصندوق المغطى بالقطيفة السوداء الموضوع على خشبة المسرح امام خلفية سوداء يصلح لاجراء مختلف الالعاب السحرية بالظهور المفاجئ او اختفاء المناديل والطيور وحتى الساحر نفسه .

ويثمن الفيزيائيون هذه الخاصية ايضا للاجسام السوداء الى حد كبير . وقد قرروا اختيار الاجسام السوداء بالذات فى بحثهم عن الجسم « القياسى » المذكور ، لتكون عاملا قياسيا . فالجسم الاسود يمتص اكبر كمية من الاشعاعات وهذا يعنى بانه يسخن بواسطتها الى اعلى درجة الحرارة بالنسبة للاجسام الاخرى .

والعكس صحيح : فان الجسم الاسود يصبح لدى تسخينه الى درجة حرارة عالية مصدرا للضوء ، وتنبعث منه الاشعاعات فى درجة

الحرارة المذكورة بقوة اكبر من جميع الاجسام الاخرى . لذا فباستعمال مثل هذا الجسم المشع يمكن وضع قوانين الاشعاع الحرارى العددية بافضل شكل .

ولكن تبين بان الاجسام السوداء نفسها تولد الاشعاعات بدرجات مختلفة . وفي الواقع ان السخام مثلا يكون احيانا اكثر او اقل سوادا من القطيفة السوداء ، ويتوقف ذلك على نوعية الوقود المسبب للسخام . كما ان القطيفة نفسها تختلف بحسب انواعها . واحيانا قد لا تكون هذه الاختلافات كبيرة جدا ، ومع ذلك فمن الافضل التخلص منها .

ثم توصل الفيزيائيون الى تصور اكثر الاجسام سوادا . فتبين بانه ... صندوق . وهو طبعا صندوق من نوع خاص يضم فى داخله الاشعة الحرارية . ويجب ان يصمم بشكل متميز : من اضلاع وجدران داخلية مغطاة بالسخام مثلا . واذا ما نظرت الى الرسم لوجدت بان الاشعة النافذة الى داخل الصندوق عبر فتحة صغيرة جدا فى جداره لا تتسرب الى خارجه ابدا . وتبقى حبيسة فيه الى ابد الابدين . وسيقول الفيزيائى بان مثل هذا الصندوق يمتص كل الطاقة الشعاعية الداخلة اليه .

ولنجعل الآن الصندوق نفسه مصدرا للضوء ، وهو الغرض الذى صنع من اجله . فعند تسخينه بدرجة كافية تأخذ جدران الصندوق بالتوهج ، ويبدأ بتوليد الضوء الذى تمكن مشاهدته . وتكون الاشعاعات الحرارية والضوئية لمثل هذا الصندوق فى درجة الحرارة المعطاة اكثر

شدة من جميع الاجسام الاخرى ، كما اوردنا آنفا . ولتمييز هذه الاجسام عن صندوقنا فسنطلق عليها تسمية الاجسام الرمادية .

وقد وضعت جميع قوانين الاشعاعات الحرارية « لاكثر الصناديق سوادا » ، وقد سميت باسم شامل هو الاجسام المطلقة السواد . وبعد اجراء بعض التعديلات الطفيفة المناسبة اخذ بتطبيق هذه القوانين على الاجسام الرمادية .

القوانين الدقيقة بدلا من المعطيات التقريبية

فما هى هذه القوانين ؟ لقد ورد ذكرها اعلاه ، ولكن بشكل تقريبى . ولنترجمها الآن الى لغة الفيزياء .

ينص أول هذه القوانين على ان قدرة الجسم الاسود المطلق على الاشعاع ، اى الطاقة التى يولدها بشكل ضوء وحرارة فى كل ثانية تتناسب مع القوة الرابعة لدرجة حرارته المطلقة * . وقد اكتشف هذا القانون العالمان النمساويان ستيفان وبولتزمان فى نهاية القرن التاسع عشر .

وينص القانون الثانى على انه لدى ارتفاع درجة حرارة الجسم المطلق السواد فان طول الموجة المناظرة لاقصى سطوع للضوء الذى يولده ، يجب ان تكون اقصر فاقصر ، وتنحرف باتجاه الجزء

---

* تحسب درجة الحرارة المطلقة ابتداء من 273° تحت درجة الصفر المئوية .

البنفسجى من الطيف الضوئى . وقد سمى هذا القانون باسم مكتشفه الفيزيائى النمساوى (وين) ، فسمى بانحراف وين .

وهكذا اصبح فى متناول يد الفيزيائيين قانونين عامين حول الاشعاع الحرارى ، يمكن تطبيقهما على باقى الاجسام كلها بلا استثناء . فيصف اولهما بشكل صحيح ازدياد سطوع التوهج لدى تسخين الجسم . وقد يبدو بان قانون وين لا يتفق كليا مع نتائج المراقبة ، فبازدياد درجة الحرارة فى الجسم يأخذ الاخير بتوليد نور ابيض اكثر فاكثر . وهو ضوء ابيض وليس بنفسجيا !

ولكن لنتمعن فى الامر جيدا . ان قانون وين يتحدث فقط عن اللون المناظر لاقصى سطوع فى الاشعاع الضوئى لا اكثر . وهو يفترض ضمنا بانه يتبقى بالاضافة الى هذا الاشعاع اشعاع آخر ، والذى بدأ قبل ذلك فى درجة الحرارة الواطئة ، وهو اشعاع ذو موجة طويلة وكبيرة ، ولكن يختلف عن الآخر فى اللون . وعند تسخين الجسم فان اشعاعاته توسع مجاله الطيفى ، وتتولد مناطق جديدة فى الطيف . ونتيجة لذلك فبارتفاع درجة الحرارة بقدر كاف ، يبرز طيف ضوئى للتوهج كامل ومرئى .

ويمكن تشبيه ذلك بالاوركسترا حيث تشترك فى العزف الآلات الواحدة تلو الاخرى بارتفاع درجات الانغام ، الى ان يبلغ العزف ، فى النهاية ، القمة فى التناغم الموسيقى من اصوات آلة الترومبون الخشنة (الباس) العميقة ــ الاحمر ــ الى الاصوات الرفيعة الحادة

للمزامير (الفلوت) ـ البنفسجى ... وفى آن واحد يمثل اللون الابيض الطيف الكامل وهكذا فان صحة قانون وين لا غبار عليها . الا ان الطبيعة وجهت ضربة الى الباحثين فى مجال الاشعاع الحرارى فى جبهة اخرى تماما .

الكارثة فوق البنفسجية

للفيزيائيين ولع بالقوانين العامة . فحالما يكتشفون بان ظاهرة واحدة ما تفسر من مختلف الجوانب بعدة قوانين ، حتى يبدأون بمحاولة جمعها فى قانون عام واحد ، يستوعب كل الجوانب تلك فى وقت واحد .

وقد قام بمثل هذه المحاولة الفيزيائيان الانجليزيان رايلى وجينز بخصوص قوانين الاشعاع الحرارى . وقد نصّ القانون الشامل ، الذى حصلا عليه ، على ان شدة الاشعاع المنبعث نتيجة تسخين الجسم يتناسب طرديا مباشرة مع درجة حرارته المطلقة ، وعكسيا مع مربع طول الموجة الضوئية المنبعثة منه .

وقد بدا بان هذا القانون يطابق جيدا معطيات التجارب المناظرة . ولكن اتضح فجأة بان التطابق يتوفر فى الجزء الاوسط من الطيف المنظور فقط ، فى مكان وجود اللونين الاخضر والاصفر . وعند الاقتراب من الاشعة الزرقاء والبنفسجية وفوق البنفسجية فان القانون يغدو غير صالح للتطبيق اكثر فاكثر :

واستنتج من قانون رايلى وجينز بانه كلما قصرت الموجة كلما ازدادت شدة الاشعاع الحرارى . ولم يلحظ شيء من ذلك اثناء التجربة . والاكثر من ذلك مما يبعث على عدم الارتياح جدا هو ان شدة الاشعاع هذه يجب لدى الانتقال الى موجات اقصر ان تنمو الى ما لا نهاية تماما !

لكن هذا الشيء لا يحدث طبعا . فلا يمكن ابدا حدوث نمو لانهائى لشدة الموجات . فاذا ما قاد اى قانون فيزيائى الى « المالانهاية » فهذا معناه ان نهايته قد حلت . ففى الطبيعة توجد اشياء كبيرة وكبيرة جدا ، وحتى يصعب تخيلها ، لكن لا يوجد شيء بدون نهاية او حدّ ، عدا الكون نفسه .

وقد عرفت هذه الحالة المتكونة فى نظرية الاشعاع لدى الفيزيائيين مجازا باسم « الكارثة فوق البنفسجية » . ولم يكن احد منهم آنذاك ، فى نهاية القرن التاسع عشر يستطيع حتى مجرد التفكير بانها لم تكن كارثة قانون واحد خاص وبنطاق ضيق . فقد ظهر فيما بعد بانها كانت كارثة كل النظرية التى ولدت القانون — كارثة الفيزياء الكلاسيكية .

مأزق الفيزياء الكلاسيكية

اعتقد بعض الفيزيائيين فى ذلك الوقت بان العقبة التى واجهت الفيزياء الكلاسيكية متمثلة بنظرية الاشعاع هى غير جوهرية وليست بذات بال . ولكن بالنسبة للنظرية فاية عقبة مهما كانت صغيرة

تكتسب اهمية . فكل شىء فيها مرتبط ببعضه البعض . واذا ما اعطت شرحا غير صائب لاحد الامور فانها تعرض للشك تفسيراتها للظواهر الاخرى . واذا لم يتسن للنظرية عبور عقبة صغيرة ، فما بالك بالعقبات الكبيرة !

وقد قام الفيزيائيون بمحاولات عديدة للتغلب على الصعوبات الناجمة فى نظرية الاشعاع . ولا نجد فى هذه المحاولات اليوم تناقضا منطقيا . فلا داعى للعجب .

ان حال النظرية عندما تقع فى مأزق يشبه حال قطة داخل بيت محترق وليس لها من مخرج سوى ... النهر . فتعدو هذه القطة من احدى زوايا البيت الى الاخرى ، دون ان يخطر ببالها القفز الى الماء . لان ذلك ضد كل غرائز القطة !

ونفس الشيء يحدث للعلماء عندما يبدأ بالاحتراق « البيت » الذى عملوا فيه طيلة حياتهم . البيت المعتاد والواضح ، كالهواء . وحاول الفيزياء اخماد نيران الحريق ، ولكن عندما لم يتم لهم ذلك ، فلم يخطر ببالهم مغادرة « بيتهم » .

ومع ذلك فقد اتضح للعلماء الاكثر نباهة بان الفيزياء الكلاسيكية دخلت فى مأزق . وظهر ان نظرية الاشعاع ليست المأزق الوحيد . وفى تلك السنوات نفسها انهارت نظرية الاثير .

وقد انهار كل ذلك بسرعة كبيرة ! وسادت الحيرة واليأس صفوف الفيزيائيين . فما العمل ؟

وصرخ بعض العلماء بانه اذا لم تتفق الحقائق مع النظرية ، فهذا من سوء حظ الحقائق ! وهذا معناه ان الطبيعة لا تخضع لاية قوانين ! وان الطبيعة مبهمة (غير قابلة للفهم) !

بينما اعلن العلماء الماديون : اذا لم تستطع النظرية تفسير الحقائق ، فهذا من سوء حظ النظرية ! وهذا يبعث على ضرورة اعادة النظر فيها من الاساس !

وقد اثبت التاريخ مرة اخرى بان الضرورة الكبرى تخلق عظماء الناس . فقد وجد مخرجا من المأزق الذى تورطت فيه الفيزياء الكلاسيكية وافكارها الجامدة التى لا تتغير ، كل من ماكس بلانك فى عام ١٩٠٠ عندما ادخل فى العلم مفهوم الكمات ، والبرت اينشتين فى عام ١٩٠٥ الذى اوجد نظرية النسبية .

ايجاد مخرج من المأزق

فماذا كان الاكتشاف الذى حققه بلانك ؟

قد يبدو للوهلة الاولى بانه من الصعب اعتباره حتى فى عداد الاكتشافات . فقد كان هناك قانونان حول الاشعاع الحرارى . وكان كل منهما يبدو ، عند أخذه على حدة ، صحيحا جدا . ولكن عندما جمعا فى قانون واحد حدثت « الكارثة فوق البنفسجية » . ويبدو ذلك كما لو اجتمع شخصان لهما طريقة واحدة فى التفكير ، وبعد مناقشة قصيرة فيما بينهما توصلا الى افكار « جهنمية » .

كان بلانك آنذاك قد تجاوز الاربعين . وقد درس لسنوات طويلة الاشعاع الحرارى . ودخلت النظرية امام عينيه فى مأزق ، فأخذ ، شأنه شأن زملائه الآخرين ، يبحث عن مخرج منه . فاختبر كل سلسلة الافكار واقتنع اخيرا بان ليس هناك من خطأ . ثم واصل بلانك البحث ولكن فى اتجاه آخر .

وقد تذكر بلانك بعد مضى سنوات طويلة فيما بعد بانه لم يعمل فى حياته ابدا بمثل تلك الروح الملهمة الفتية كما عمل فى تلك السنوات من مطلع قرننا الحالى . وأخذت تبدو له انواع الامور المستحيلة من الممكنات،وراجع احتمالات النظرية الواحد بعد الآخر .

وكانت تقود بلانك فى بادئ الامر فكرة بسيطة جدا . فقد وحد رايلى وجينز قانونى الاشعاع الحرارى فى قانون واحد ، ولكنهما حصلا آنذاك على نتيجة غير معقولة . افلا يمكن « ربط » هذين القانونين بشكل يمنع حدوث اللامعقول ؟

وحاول بلانك ان يجد معادلة عامة ما لمادة التجربة ، بحيث لا تناقض هذه المادة . وبعد بحوث عديدة استطاع ايجاد هذه المعادلة . وكان لها شكل معقد جدا . ففيها صيغ ليس لها معنى فيزيائى واضح ، وتبدو للوهلة الاولى كمجموعة من المقادير جمعت سوية صدفة لا تربطها ببعضها البعض رابطة ما . ولكن الغريب فى الامر هو ان هذه المعادلة المركبة كالطبيخ تطابق بشكل رائع نتائج التجربة .

بالاضافة الى ذلك فيمكن ان يستنتج منها قانون ستيفان ــ بلتزمان وقانون وين . وبشكل عام فليس فى هذه المعادلة اية « لانهايات » . وكما يقول الفيزيائيون فان هذه المعادلة كانت صحيحة تماما .

اهو نصر؟ أخروج من المأزق ؟

كلا ، لم يحن الاوان بعد لاظهار الفرح . فان بلانك ، كأى عالم اصيل آخر ، كان يميل الى التشكك فى قيمة المعادلة التى اوجدها . اذ يمكن للمرء اذا ضرب عشرين مرة على مفاتيح البيانو ان يعزف لحنا ما صدفة . فكيف السبيل لاثبات انه جاء وفق قانون ما ؟

فكان لا بد من استنتاج المعادلة المستحصلة من شيء ما . فالعلم لا يعرف القاعدة التى تقول بان المنتصر لا يمكن ان يتعرض للانتقاد . بل بالعكس ، يجب انتقاده بحماس ! فما دامت خطوات الفائز فى الصراع مع الطبيعة دون اساس ، فلا يجوز حساب هذا الفوز .

وهنا بالذات لم يحالف بلانك التوفيق ، فان معادلته لا تريد الخضوع لاحكام قوانين الفيزياء الكلاسيكية . ومن ناحية اخرى فانها تتجاوب بشكل رائع مع معطيات التجربة .

وكان ذلك موقفا مأسويا وجد فيه بلانك نفسه فالى اى جانب يقف ، وهل يأخذ جانب النظرية الكلاسيكية ضد الحقائق بل يقف مع الحقائق ضد النظرية القديمة ؟ فاختار بلانك الحل الاخير ــ بالوقوف الى جانب الحقائق .

فما هو الشيء الذى وجد فى الفيزياء الكلاسيكية مما اعاق استنباط معادلة بلانك منها ؟ لم يكن ذلك سوى احد مبادئها الاساسية . وهو مبدأ حفظ (استمرارية) الطاقة الذى كان شائعا ولا يقبل الشك لدى الفيزيائيين آنذاك .

فما معنى هذا المبدأ ؟ قد يبدو المبدأ المذكور لاول وهلة مناقضا لروح الفيزياء الكلاسيكية التى اعتمدت منذ نشأتها على الاعتراف بعدم استمرارية الاشياء . وفى الواقع ما دام يوجد فضاء فراغى فى العالم فان جميع الاشياء يجب ان تكون منفصلة من بعضها البعض ، ويجب ان يكون لها حدود . وان الاشياء لا تتحول الى بعضها البعض بصورة مستمرة ، وكل منها تنتهى عند نقطة معينة .

اما داخل الاشياء ؟ وهنا ايضا لا تلحظ الاستمرارية . واضطرت الفيزياء الكلاسيكية فى نهاية القرن التاسع عشر الى الاعتراف بوجود الجزيئات والفضاء الفراغى بينها . وتكون للجزيئات حدود واضحة ، والشيء المستمر هو الفراغ الموجود فيما بينها .

وبالمناسبة فان الجزيئات تؤثر بطريقة ما عبر هذا الفراغ الواحدة على الاخرى . وقد حاولت الفيزياء الكلاسيكية منذ ايام فراداى شرح هذا التأثير المتبادل ، فعزته الى وجود الوسط البينى الذى ينتقل عبره التأثير المتبادل بين الجزيئات .

اما الطاقة ؟ كان الاعتقاد السائد هو ان الجزيئات تتبادل الطاقة عند اصطدامها مع بعضها ، وذلك بكميات مختلفة الى حد كبير . ويتم تبادل الطاقة هذا بدقة وبموجب نفس القوانين التى تجرى بواسطتها ضربات كرات لعبة البليارد . اذ يطير الجزئ فيصطدم بآخر ثابت فيمنحه جزءا من طاقته الحركية ، وبعد ذلك يطير الجزيئان فى اتجاهين مختلفين . وعندما يصطدم الجزيئان بصورة مستقيمة ومباشرة فان الجزىء الطائر قد يتوقف عن الحركة بينما يكتسب الجزىء الثانى سرعته الحركية . وهكذا تتبادل الجزيئات الطاقة باستمرار .

كما وجد ضرب آخر من الطاقة لا علاقة له بحركة الجزيئات ويسمى بطاقة الحركة الموجية . ومنذ ذلك الوقت الذى اثبت فيه ماكسويل بان الضوء هو عبارة عن موجات كهرومغناطيسية ، وجب على طاقة الاشعاع الضوئى (بالاخص التى أصلها حرارى) الخضوع لقوانين الموجات العامة .

ولكن هذه الطاقة مستمرة ايضا . وهى تنتشر مع الموجة المتحركة . وتسيل هذه الطاقة لجريان الماء من الحنفية . وتستهلك اية كمية معطاة من الطاقة باستمرار مثل الماء ، الى ان يمتلئ الوعاء به .

ونحن عندما نقسم قطعة من الزبدة الى اجزاء فاننا لا نشك فى تقطع القطعة . ونفترض باننا يمكن ان نقطعها باى حجم نريد مهما صغر . وعندما طرحت فى ميدان العلم فكرة تصور الجزيئات

اصبح واضحا بانه لا يجوز « قطع » قطعة الزبدة الاصغر حجما من جزىء الزبدة .

اما بخصوص الطاقة فلم يوجد مثل هذا التصور حول التقسيم (discreteness) . وبدا ان التركيب الذرى (atomistic) للمادة لا يتطلب ان تكون الطاقة مؤلفة من « قطع » .

ويكفينا التطلع الى حوالينا لنتأكد من ذلك ، ولنأخذ على سبيل المثال الشمعة المحترقة . فانها تضىء بنورها الغرفة وهى تنشر الطاقة الضوئية بانسياب ودون انقطاع . وبنفس الطريقة ترسل الشمس بهدوء سيلا غير منقطع من الضوء . او لنأخذ تصاعد سرعة القاطرة باستمرار (ومعها الطاقة) عند سيرها فوق منحدر الى اسفل ، او سرعة حجر ساقط فى هوة . كما ان امواج البحر تتحرك بانتظام بفعل الطاقة المكتسبة من حركة الرياح .

ولكن ماذا سيحدث لو ان الاجسام لا تكتسب او تعطى الطاقة باستمرار بل بوجبات ؟ اذن لتغير كل ما نشاهده فى الواقع بصورة حادة ، كما على شاشة السينما فى الايام الغابرة . ولومضت الشمعة ، فتارة يضىء نورها وتارة يخمد . ولكان ضوء الشمس ايضا بشكل وميض : ولأعطت وجبة من الطاقة الضوئية ، ثم تخمد بعدها لحين انبعاث الوجبة القادمة . ولتحرك القطار النازل من المنحدر بوجبات ، ولاكتسب الحجر الساقط فى الهوة سرعته بشكل صدمات متقطعة .

هذا محض هراء ! وهذا لم يحدث ابدا !

ربما كان ذلك هو الجواب الذى حصل عليه بلانك من اول رجل طرح عليه فكرته فى كون طاقة الاشعاع ذات طبيعة ذرية (atomistic) ايضا كالمادة ، وانها تعطى وتكتسب لا بصورة مستمرة بل بوجبات ، وبشكل « ذرات » منفصلة . وقد اطلق بلانك على هذه الوجبات تسمية (كوانتم) ، وهى كلمة لاتينية تعنى « كمية » . وهيهات لو عرف بلانك آنذاك الكيفية التى ستنمو اليها هذه الكمية !

وكانت الكـّمات بالنسبة لمعادلة بلانك ذات اهمية بالغة الحيوية : وبدونها لذبلت المعادلة كالشجرة بلا ماء ، ولاضطرت لدخول خزانة محفظات الاوراق القديمة للعلم التى علاها الغبار . الخزانة التى تحتوى على الكثير من المعادلات التى لم يتسن اثباتها .

ونتيجة لاقتراح الكمات اصبح لمعادلة بلانك اساسا تستند عليه . الا ان هذا الاساس نفسه .. كان معلقا فى الهواء : فلم يكن له وجود فى الفيزياء الكلاسيكية ! وهو بالذات ما كان يقضّ مضجع العالم الشديد الحذر بلانك . فمن الصعب ان يتخلى الانسان عما اعتاد عليه طيلة حياته !

الكمّات « المراوغة »

ان كمّ الضوء هو كمية ضئيلة جدا من الطاقة . والامساك بها ليس اسهل من ادراك وزن الذرة مثلا . فتحتوى اصغر دقيقة

من الغبار على مليارات الذرات . وتحتوى كمية الطاقة الضوئية الضئيلة الصادرة عن حشرة اليراعة (glow-worm) على مليارات الكمات .

فما هو مقدار كميات او وجبات الضوء هذه منفصلة ؟

وهنا يقدم بلانك اكتشافه الهام جدا ، الذى يقول فيه بان هذه الكميات تختلف باختلاف انواع الاشعاعات . فكلما كان طول الموجة الضوئية قليلا ، اى كلما ازداد ترددها (وبتعبير آخر كلما كان الضوء « اكثر بنفسجة ») ، كلما ازدادت شدة الضوء .

ويعبر عن ذلك رياضيا بموجب علاقة بلانك الشهيرة بين تردد وطاقة الكمّ :

ق = $h\nu$

حيث (ق) تمثل الطاقة فى الكم ، و (ν) تردد الكم ، اما المقدار (h) فيلعب دور معامل التناسب . وقد تبين بان هذا المعامل هو واحد لجميع انواع الطاقة المعروفة حتى ايامنا هذه . واطلقت عليه تسمية « ثابت بلانك » او « كمّ الفعل » . واهميته بالنسبة للفيزيائيين عظيمة جدا ، وهو ضئيل القيمة ، اذ تعادل قيمته حوالى ٦ × ١٠^-٢٧ ارج فى الثانية .

ان القيمة الضئيلة للكم هذه تبين لنا سبب كون الشمعة او الشمس وكذلك جميع مصادر الضوء الاخرى المعروفة لدينا تضىء « باستمرار » ودون انقطاع . فلنحسب على سبيل المثال كم عدد الكمات التى توجد فى الطاقة الضوئية الصادرة عن مصباح ذى

٢٥ واط في الثانية . واذا ما اعتبرنا ان ضوء المصباح اصفر فنجد حسب علاقة بلانك المقدار ٦ × ١٠ ^١٩^ ، وهو ٦٠ مليار مليار من وجبات الطاقة في الثانية . في حين ان المصباح ذي ٢٥ واط لا يعتبر مصدرا ساطعا للضوء ابدا !

فهل نستنتج من ذلك باننا لا نستطيع التقاط وميض الضوء الحقيقي للمصباح او الشمعة لان عين الانسان ليست حساسة الى درجة تساعدها على ملاحظة وجبات الطاقة الضوئية الصغيرة الى اقصى حد ؟ لكن هذه الفكرة خاطئة .

ان العين ليست عضوا حساسا الى درجة لا حد لها . وقد اثبتت ذلك تجارب العالم الفيزيائي السوفييتي س . فافيلوف . فقام بوضع شخص ما في الظلام لفترة معينة من الزمن (من اجل زيادة حساسية العين) . ثم فتح فافيلوف بعد ذلك مصدرا ضعيفا جدا للضوء ، لا يعطي اكثر من عدة كمات في الثانية . فسجلتها العين جميعها و بصورة منفردة تقريبا !

فالمسألة لا تتوقف على مقدار الكمات بل على السرعة الهائلة التي تتعاقب فيها الواحد بعد الآخر . فلقد شاهدنا بانه حتى المصباح الضعيف يولد مليار المليارات من الكمات في الثانية .

وعين الانسان تتصف كاي جهاز آخر بالعمل بديمومة . وهي لا تستطيع تسجيل الظواهر بصورة منفصلة اذا ما كانت تتتابع الواحدة بعد الاخرى بسرعة كبيرة . وتعتمد السينما على صفة الديمومة

هذه بالذات لدى عين الانسان . فتبدو الحركة على الشاشة بالنسبة للمشاهد وكانها مستمرة ، ولو انه يعرف جيدا بان الفيلم التقط كأجزاء متقطعة ويتألف من صور منفردة .

وتتابع كمات الطاقة المنبعثة من مصدر الضوء الواحد بعد الآخر بسرعة تفوق كثيرا سرعة تتابع الصور فى الفيلم السينمائى . ولهذا السبب فان ردود افعال العين لكل كمٌ تتوحد فى الانطباع الضوئى المستمر .

وقد اجرى س . فافيلوف تجاربه فى الثلاثينيات من قرننا الحالى ، و عندها كانت فكرة بلانك حول الكمّات قد حازت على اعتراف الجميع منذ زمن طويل . الا ان بلانك لم يستطع بنفسه ان يثبت صحة اكتشافه بالتجربة .

ان المعادلة التى تثبت التجربة صحتها ، لكنها تكون غير صادرة عن نظرية ما ، تبعث على الشك دوما . فما الحال اذا كانت هذه المعادلة تناقض بشكل حاد وجهة النظر العامة . لذلك ، فانه عندما اعلن بلانك فكرته فى اكاديمية العلوم ببرلين ، فانها لم تثر حماسا كبيرا فى الاوساط العلمية . والعلماء هم بشر ايضا .

وقد ادرك بلانك نفسه جيدا مدى الجسارة التى تضمنها هجومه على الفيزياء الكلاسيكية ، وكان يبحث بنشاط عن تبرير لمحاولته . ولكنه لم يكن يستطيع ان يتصور طبعا انجازاته العظيمة ، التى أدت بعد مرور عدة سنوات الى احداث ثورة فى علم الفيزياء كله !

... ومرت اعوام ۱۹۰۱ و ۱۹۰۲ و ۱۹۰۳ و ۱۹۰٤ دون ان تجذب نظرية الكمات اهتمام الفيزيائيين . ولم تكن الاعمال العلمية آنذاك لتزيد على عدد الاصابع ...

ظاهرة ليس لها تعليل

وحدث في عام ١٩٠٥ ان نشر احد افراد مكتب براءات الاختراع السويسري ، واسمه البرت اينشتين ، في المجلة الالمانية « نشرة الفيزياء » (Physikalische Rundschau) نظريته حول ظاهرة التحول الكهروضوئي (photoelectric effect) في المعادن .

وكانت هذه الظاهرة قد بلغت مرحلة « النضوج » من وجهة النظر العلمية في الوقت الذي قرر فيه اينشتين دراستها . وكان العالم أ . ستوليتوف الاستاذ في جامعة موسكو قد اكتشف منذ عام ١٨٧٢ ما يسمى بظاهرة التأثير الضوئي . ثم درسها بعد ذلك الفيزيائيان الالمانيان هيرتز ولينارد .

وقد أخذ ستوليتوف دورقا مفرغا من الهواء ووضع فيه لوحين معدنيين وربطهما ببطارية كهربائية . ومن الطبيعي فان التيار الكهربائي لم يمر عبر الفراغ . ولكن عندما تم توجيه ضوء مصباح زئبقي على احد اللوحين تولد تيار في الدائرة الكهربائية . وعندما اطفئ الضوء توقف مرور التيار .

ووضع ستوليتوف استنتاجا صائبا لهذه الظاهرة وهو انه قد

ظهرت فى الدورق عوامل ناقلة للتيار ـ عرفت فيما بعد باسم الالكترونات ـ وانها لم تبرز الا عند توجيه الضوء على اللوح .

وبدا واضحا تماما بان هذه الالكترونات انطلقت من المعدن المضاء مثلما تتطاير جزيئات السائل الساخن فى الهواء . على ان كلمة « مثلما » هنا لا تعنى فى الواقع وجود اى تشابه بين الحالتين . فانطلاق الالكترونات من المعدن له طبيعة اخرى وغير مفهومة تماما فى نفس الوقت .

صحيح ان الضوء عبارة عن موجة كهرومغناطيسية . ومن الصعب تصور كيف تستطيع الموجة سلب الالكترونات من المعدن . فالامر هنا لا يتعلق باصطدام جزيئة ما من الطاقة بجزيئة اخرى ، مما يؤدى الى تطاير احداها الى سطح السائل .

كما لوحظت مسألة هامة اخرى . فقد ظهر انه يوجد لدى كل من المعدنين قيد البحث طول محدد لموجة الضوء المنير . واذا ما اكتسب الضوء طول موجة اكبر فان الالكترونات تختفى فجأة من الدورق ، ويتوقف مرور التيار فى الدائرة الكهربائية مهما ازدادت شدة الضوء عند ذاك .

وكان هذا امرا غريبا جدا . فمفهوم ان الالكترونات تتطاير من المعدن لان الضوء يكسبها نوعا من الطاقة . وكلما كانت الانارة اشد سطوعا كلما ازداد التيار قوة . ويكتسب المعدن عند ذلك طاقة اكبر ويتطاير منه عدد اكبر من الالكترونات .

ولكن مهما كان طول الموجة الضوئية ـ فان المعدن يكتسب مع ذلك طاقة . صحيح انه اذا ما ازداد طول الموجة فان هذه الطاقة ستنقص ، وينقص بذلك عدد الالكترونات المتطايرة من المعدن . ولكن لا بد من وجود تيار ، مهما كان ضئيلا . بينما لوحظ في التجربة انعدام التيار كليا ، كما لو ان الالكترونات قد توقفت عن تقبل الطاقة الضوئية !

فكيف يمكن تفسير اعراض الالكترونات المفاجئ عن « غذائها » من الطاقة ؟ هذا شيء حار الفيزيائيون في تعليله ، فقد كان فوق مستوى ادراكهم .

الفوتونات

لقد عالج اينشتين ظاهرة التحول الكهروضوئي من وجهة نظر مختلفة . اذ حاول ان يصور لنفسه حقيقة عملية انطلاق الالكترون من المعدن بتأثير الضوء .

ففي الظروف الاعتيادية لا تشاهد سحابة من الالكترون تحوم حول المعدن . وهذا يبعث على الاعتقاد بوجود قوة ما تربط الالكترونات بالمعدن . ونحتاج شيء من الطاقة من أجل تحريرها من قبضة المعدن . وقد حصل على هذه الطاقة في تجربة ستوليتوف بواسطة الموجات الضوئية .

الا انه يوجد للموجة الضوئية طول معين يبلغ عددا من اجزاء الميكرون ، وتتركز طاقتها فى الحجم الضئيل الذى يشغله الالكترون . وينتج من ذلك ان الموجة الضوئية فى حالة التأثير الضوئى (photo effect) تسلك سلوك « جسيم » صغير جدا ، والذى عند اصطدامه بالالكترون يؤدى الى طرده من المعدن .

فكيف نتصور شكل هذا الجسيم ؟ يبدو انه جسيم ضوئى بشكل كرّية ، كما وصفه نيوتن (لانه اعتبر الضوء عبارة عن سيول من الجسيمات الضوئية وليس بشكل موجات) . وما هو مقدار الطاقة التى يحملها كل جسيم واحد منها ؟ ان الحسابات تبين بان هذا المقدار غير كبير . فما الذى يمنعنا اذن من الافتراض بانه يساوى ذلك الكم الذى « استحدثه » بلانك قبل خمس سنوات ؟

وهكذا فان اينشتين افترض بان الضوء هو مجرد سيل من كمات الطاقة . وتكون جميع كمات طول الموجة الضوئية المعطاة متساوية تماما ، اى انها تحمل عددا متساويا من وجبات الطاقة . وسميت كمات الطاقة الضوئية هذه فيما بعد باسم الفوتونات .

وفور ذلك امكن اعطاء شرح تام للمسألة بكل بساطة . فان الفوتون يحمل كمية ضئيلة جدا من الطاقة . ولكن عند « اصطدام » الفوتون بالالكترون فان هذه الطاقة تكفى لتحطيم الروابط التى تربط بين الالكترون والمعدن ، وتؤدى الى طرد الاول الى الخارج .

ومن جانب آخر ، فمن الواضح ، انه اذا كانت طاقة الفوتون غير كافية لتحطيم تلك الروابط ، فان الالكترونات لا تتطاير من المعدن ، ولا يتولد تيار كهربائي . وبموجب معادلة بلانك فان طاقة الكم تتحدد بمقدار تردده ، فتنقص بازدياد طول الموجة الضوئية . ويتضح من ذلك فورا وجود حدود للتأثير الضوئي . ويمكن القول ببساطة انه اذا كان طول الموجة الضوئية كبيرا جدا فان الفوتونات لا تملك الطاقة الكافية لطرد الالكترونات من المعدن .

وعندئذ لا تهم مدى شدة الضوء ، وسواء اكان هناك الف فوتون ام فوتون واحد يطير الى المعدن ويصطدم بالكتروناته . والاخيرة تقف موقف اللامبالاة من الامر . ولكن المسألة تختلف عندما تكون في الفوتونات كمية كافية من الطاقة . وفي هذه الحالة كلما تزداد شدة الضوء كلما ازداد عدد الفوتونات الداخلة في المعدن في الثانية ، وبذلك يزداد عدد الالكترونات المتطايرة منه ، مما يؤدي الى توليد تيار أقوى .

وهكذا تم الكشف عن تفسير للظاهرة الغريبة . الا ان هذا التفسير مثله مثل نبوءة بلانك ينسف الدعائم الاساسية للفيزياء الكلاسيكية . فالضوء بالنسبة لها عبارة عن موجات كهرومغناطيسية ، وليس تلك الفوتونات ــ « البدعة » التي استحدثها البعض مؤخرا . وهكذا اثارت نظرية اينشتين من جديد المناقشات التي دارت حوالي قرنين حول ماهية الضوء .

فما هو الضوء اذن ؟

ان المناقشات حول جوهر الضوء لم تتوقف ابداً في علم الفيزياء . وقد برزت قضية طبيعة الضوء في فجر الفيزياء الكلاسيكية وعاشت حياة صاخبة . وكانت القضية هي : ما هو الضوء — هل هو موجات ام جسيمات ؟

وقد برز هذان الرأيان حول الضوء في علم الفيزياء في وقت واحد تقريبا . فأكد نيوتن بان الاجسام المضيئة ترسل سيولا من الجسيمات والكريّات الضوئية . بينما قال الهولندي هيوجنز ، وهو أحد معاصري نيوتن ، بان الاجسام المضيئة تنبض وتكون موجات في وسط الاثير المحيط بها .

وكان لكلا التفسيرين مؤيدون . وبدأ صراع طاحن بين الفريقين منذ السنوات الاولى لنشوء النظريتين . وكان النصر المؤقت يحالف هذا الفريق احيانا ، واحيانا الفريق الآخر . واستمر الامر على هذه الحالة فترة تزيد على المئة عام .

وبدا اخيرا ان تجارب يونج وفرينيل وفراونهوفر قد حملت النصر الحاسم للنظرية الموجية للضوء . وقد طابقت الظواهر المكتشفة حديثا حول التداخل والحيود (diffraction) والاستقطاب في الضوء نظرية هيوجنز كل المطابقة ، بينما بدت غير مفهومة تماما من وجهة نظر نظرية نيوتن .

ومنذ تلك اللحظة بدأ تطور علم البصريات بسرعة كبيرة . وتكونت نظريات رائعة حول الظواهر البصرية ، وتم صنع آلات بصرية فى غاية التعقيد ، وفى النهاية أكمل ماكسويل بناية علم البصريات باثباته الطبيعة الكهرومغناطيسية للموجات الضوئية . وهكذا اصبح انتصار النظرية الموجية تاما ولانزاع فيه .

ولكن لم يكد يمضى نصف قرن من الزمان حتى بعثت نظرية الجسيمات فى الضوء (corpuscular theory) من جديد . كما ان التأثير الضوئى الذى لم تستطع النظرية الموجية ايجاد تفسير له – وبدا كأنه بقعة صغيرة حزينة فوق خلفية تفيض فرحا ! – قد وجد خير تفسير له من قبل النظرية المعاكسة .

واثير من جديد النقاش الذى خمد قبل قرن من الزمان . واصاب الارهاق كلتا النظريتين المتضادتين ، واظهرتا استعدادهما للصلح . وثبتت تدريجيا فى اذهان علماء الفيزياء فكرة محيرة لكن لامهرب منها ، وهى ان الضوء عبارة عن موجات وجسيمات فى آن واحد !

ولكن لماذا لا يظهر الضوء فى اى مكان حقيقته « الازدواجية » ؟ لماذا نجده فى بعض الظواهر يبدو وكأنه جسيمات فقط ، بينما فى الظواهر الاخرى يبدو كموجات ؟ وسنعود الى هذا السؤال مرة ثانية فيما بعد .

ولم تكن المسألة الثانية التى برزت بظهور نظرية اينشتين بسيطة ايضا . فقد ظهر بان الالكترونات فى ظاهرة التحول الكهروضوئى لا

تستوعب اية وجبة من الطاقة تقدم اليها . فاذا لم تتعادل هذه الوجبة مع مقدار محدد او تزيد عليه فان الطاقة لا تجد اى اقبال عليها .

ولكن هل الامر بهذه الصورة دائما ؟ لقد تبين بان الالكترون الذى لا يرتبط باية قوى بالالكترونات المجاورة يكف عن كونه جزءا منفصلا ، ويستوعب اية وجبات من الطاقة . واذا ما وجد الالكترون فى المعدن ، مثلا ، فانه يغير مزاجه ويطلب قدرا معينا من وجبات الطاقة .

فما هو السبب؟ لقد كشف سر ذلك بعد مرور حوالى عشرين عاما .

بطاقات الزيارة ... للذرات

وفى تلك الفترة حاول الفيزيائى الدانماركى الشاب نيلس بوهر (Niels Bohr) استخدام المفاهيم الجديدة حول الكمات فى أحد حقول العلم الجليلة وهو علم الظواهر الطيفية (spectroscopy) . وحتى بداية القرن العشرين كانت الدراسات فى هذا المجال قد بلغت عدة مئات . وكان التحليل الطيفى يخطو بخطوات واسعة الى الامام ، ويقدم خدمات عظيمة للكيمياء والفلك والميتالورجيا وغيرها من العلوم .

والعالم مدين لعبقرية نيوتن ذات مجالات النشاط العديدة فى اكتشاف الطيف . لكن التحليل الطيفى لم يظهر الى الوجود الا قبل

قرن من الزمان . ففى عام ١٨٥٩ كرر العالم الكيميائى الالمانى بنزن (Bunsen) تجربة نيوتن القديمة بان وضع موشورا زجاجيا فى طريق اشعة الشمس لتحليلها الى طيف . واستخدم بنزن فى تجربته قطعة قماش محترقة بعد غمسها فى محلول الملح بدلا من اشعة الشمس . وكان نيوتن قد شاهد بان اشعة ضوء الشمس تمتد مكونة حزمة ضوئية ذات الوان مختلفة . بينما لم يشاهد بنزن مثل هذه الحزمة . وعندما وجد على قطعة القماش ملح الطعام (كلوريد الصوديوم) فانه وجد فى الطيف مجرد بضعة خطوط ضيقة ليس غير . وشاهد من بين هذه الخطوط خطا اصفر ساطعا .

وقد جذب بنزن اهتمام عالم المانى كبير آخر هو كيرخهوف (Kirchhoff) الى هذه الظاهرة ايضا . وقد استنتج الاثنان بشكل صحيح ان دور الموشور الزجاجى يقتصر على « فرز » الاشعة الساقطة عليه بحسب اطوال موجاتها . وان المنطقة الممتدة لطيف اشعة الشمس تبين بانه يحتوى على جميع اطوال الضوء المرئى . اما الخط الاصفر عندما تستخدم قطعة القماش المحترقة كمصدر للضوء فيشير الى وجود طول موجة متميز فى الطيف الضوئى لملح الطعام .

ان صيغة ملح الطعام — NaCl — معروفة جيدا . فالى اى من العنصرين الصوديوم او الكلور يعود اللون الاصفر المتكون ؟ وكان من السهل التحقق من ذلك . اذ يمكن ابدال الصوديوم بالهيدروجين وتكوين كلوريد الهيدروجين (HCl) الذى لدى ذوبانه فى الماء

يكون حامض الهيدروكلوريك . فجرى تغميس قطعة من القماش فى الحامض المذكور ، ووضعت على لهب مصباح بنزن ، وجرى فحص الطيف من جديد . فاختفى اللون الاصفر تماما . مما دل على ان الصوديوم بالذات سبّب تكون هذا اللون .

ثم اعيدت التجربة مرة اخرى . وأخذت مادة اخرى لا تحتوى على الكلور بل على الصوديوم وهى الصودا الكاوية (NaOH) . فشوهد تكون الخط الاصفر فى الطيف حالاً . فلم يبق اى مجال للشك ، بان الصوديوم لدى وجوده فى اية مادة يحمل معه « بطاقة زيارة » — هى خط اصفر ساطع فى الطيف الضوئى .

وقد اتضح فيما بعد بان الصوديوم لا يعتبر حالة استثنائية فى هذا الشأن . فكل عنصر كيميائى له طيف خاص به فقط . وكقاعدة فان بعض هذه الاطياف اكثر تعقيدا من طيف الصوديوم ، اذ تتألف من عدد كبير من الخطوط وليس من خط واحد . ويمكن تمييز طيف العنصر مهما كان المركب الذى يدخل فى تكوينه ، واينما كانت ذراته . مثلما يمكننا التعرف احيانا على صورة شخص التقطت فى سنوات فتوته بعد مرور سنوات طويلة .

وكما يمكن البحث عن شخص ما فى حشد من الناس بفحص البطاقات الشخصية لكل منهم ، فان الكيميائيين يستخدمون طرق التحليلى الكيميائى فى بحثهم عن العناصر فى عينات الصخور . لكن المهمة تصبح اكثر سهولة ان وجدت صورة الشخص . وبنفس

الطريقة يجرى البحث عن العناصر بواسطة التحليل الطيفى . ويجرى اكتشاف العناصر فى الاماكن التى لا يمكن الحصول فيها على « البطاقات الشخصية » لها ، كما فى الشمس والكواكب البعيدة وفى أتون مجمرات الافران العالية وفى البلازما .

ومما لا شك فيه اننا يجب ان نمتلك عددا كافيا من الصور اذا اردنا ايجاد جميع الناس الذين نبحث عنهم . اما فى الوقت الحاضر فنحن لا نعرف سوى ما يزيد على المئة بقليل من العناصر . وقد أخذت لجميعها تقريبا « الصور المميزة » منذ زمن طويل اعتمادا على الاطياف المميزة لها .

لماذا تولد الاجسام الضوء ؟

كان نجاح التحليل الطيفى هائلا ، لكنه نجاح يقوم على صدع كبير .

اذ ان صرح علم الظواهر الطيفية الذى استند على اساس نظرية الاشعاع الحرارى كان يحمل على كاهله طابع الاخفاق الرئيسى لهذه النظرية . وهو اخفاقها فى محاولة الاجابة على السؤال التالى : لماذا تبدأ الاجسام بتوليد الضوء لدى تسخينها ؟

وبأى شيء يتولد هذا الضوء ؟ من الواضح ان الاجزاء المكونة للاجسام هى الذرات والجزيئات . ويؤدى ارتفاع درجة حرارة الاجسام الى زيادة سرعة حركة الجزيئات . فتبدأ بالاصطدام الواحدة بالاخرى

بقوة أشد، وتهتز بصورة اسرع بعد الضربات وفى اثناء تلك الاهتزازات السريعة جدا يتولد الضوء . هذا ما كانت تقول به الفيزياء القديمة . فلماذا اذن لا تنير الاجسام فى درجة الحرارة الاعتيادية ولو بدرجة ضعيفة ؟ ففى درجة الحرارة هذه تستمر حركة واصطدام الجزيئات ببعضها البعض ايضا ! ولم يعط تفسير لذلك آنئذ .

وعندما صنع العالم الانجليزى طومسون اول نموذج للذرة فى عام ١٨٩٨ ، بدا ان حلّ لغز انبعاث النور من الاجسام قد اصبح قريبا . وقد صورت الذرات فى هذا النموذج بشكل سحب ذات شحنة موجبة وتسبح فيها الالكترونات السالبة الشحنة بكميات تكفى لمعادلة الشحنة الموجبة . وتقوم السحب الموجبة بجذب الالكترونات وتعيقها عن الحركة .

ولكن الفيزياء الكلاسيكية تحتم على الجسيمات ذات الشحنات توليد اشعة كهرومغناطيسية لدى ابطاء حركتها . وهذه الاشعة هى ، كما يبدو ، تؤلف ذلك الضوء المنبعث من الاجسام الساخنة . وقد يظهر للوهلة الاولى ان هذا التفسير يطابق الواقع . فكلما ازداد تسخين الجسم كلما ازدادت سرعة حركة الالكترونات فى ذراته ، وأخذت تتوقف بشدة اكبر بواسطة جاذبية السحب ذات الشحنات الموجبة ، وبذلك تزداد قوة الاشعاع .

ولربما كان الامر على هذه الصورة لو لم تستهلك الالكترونات طاقتها لدى الاشعاع . ولكن عندما تولد الالكترونات الضوء فانها

يجب ان تبطئ حركتها بسرعة فائقة . وبعد مرور اجزاء معدودات من الثانية لابد ان « تغوص » فى السحب الموجبة وكأنها حبات زبيب فى فطيرة « بودنج » .

ومع ذلك فقد كان هناك خطأ فى التفسير . ومضت عدة اعوام وأتضح اكثر فاكثر بان نموذج الذرة الذى وضعه طومسون غير صحيح فى المجالات الاخرى ايضا . فهو لا يقدم اجوبة لكثير من الاسئلة ، وفى مقدمتها سبب عدم اندماج الالكترونات بالسحب الموجبة الشحنة ، وحدوث تعادل شحنتها . اما الاجوبة التى امكن الحصول عليها من هذا النموذج فقد كانت فى غالبية الحالات تناقض نتائج التجارب بشكل حادّ .

وفى عام ١٩١١ اقترح الفيزيائى الانجليزى البارز ارنست رذرفورد نموذجا جديدا للذرة . فقام بتسليط اشعة ألفا المنبعثة من المواد المشعة ، والتى اكتشفت قبل فترة قليلة من ذلك ، على ذرات المواد . وكان قد عرف مسبقا بان هذه الاشعة ذات جسيمات مشحونة بشحنات موجبة .

ولدى دراسة رذرفورد ظاهرة تبعثر جسيمات ألفا بواسطة الذرات ، وجد نفسه مضطرا للوصول الى استنتاج كانت له آثار بعيدة المدى . فقد تبعثرت جسيمات ألفا بشكل يبعث على الاعتقاد بانها تطرد لا من قبل جميع السحابة الموجبة لذرة طومسون ، بل من قبل جزء صغير جدا من الذرة متمركز فى المركز . وقد ظهر بان جميع الشحنة الموجبة للذرة متمركز فى هذا الجزء الصغير من الذرة .

وقد اطلق رذرفورد على هذا الجزء من الذرة اسم النواة . فاين يكون موقع الالكترونات اذن ؟ ان الفكرة التى كانت سائدة سابقا فى كون الالكترونات مرتبطة بالشحنة الموجبة فى الذرة بواسطة القوى الكهربائية للجاذبية صحيحة ولاشك فيها . ولكن بما ان الإلكترونات موجودة على مسافة معينة من النواة ، فهذا يعنى ان هناك قوة ما تعاكس القوة الكهربائية للجاذبية المتبادلة بين الالكترونات والنواة .

ومن الواضح ان هذه القوة يجب ان تؤثر بصورة مستمرة . فالذرات تتواجد خلال فترة طويلة وبدرجة كافية ، وهذا يعنى بان القوة المعاكسة تكون موجودة دائما بوجود الجاذبية الكهربائية بين الالكترونات والنوى .

ويبدو من المعقول الافتراض بان هذه القوة يمكن ان تكون قوة طاردة مركزية . وهى تبرز اذا ما دارت الالكترونات حول نواة الذرة . ويمكن ان نحسب هل تكون هذه القوة كافية لعدم حدوث التقارب بين الالكترونات والنواة . وتظهر الحسابات بانه يكفى تماما لهذا الغرض دوران الالكترونات حول النواة بسرعات تعادل عشرات الإف الكيلومترات فى الثانية وعلى مسافة جزء من مئة مليون من السنتيمتر .

وهكذا ولد نموذج الذرة الذى اقترحه رذرفورد . وان دوران الكرة حول الخيط الذى أوحى لنيوتن بصورة غير مباشرة بفكرة الجاذبية بين الكواكب ، قد رسمت الطريق لرذرفورد من أجل وضع فكرة ذكية

وصحيحة جدا ، كما ثبت فيما بعد ، حول التركيب « الكوكبى » للذرة .

والآن يمكن العودة الى المسألة السابقة حول سبب انبعاث الضوء من الاجسام ، للبحث عن سرّها فى النموذج الجديد للذرة . ولا يبخل النموذج الجديد علينا بخدماته . ان حركة الالكترونات حول النواة هي حركة متسارعة (فالالكترونات تدور فى منحنيات مغلقة) . وهذا يعني انه ينبغي وجود اشعاعات كهرومغناطيسية فى الالكترونات . وان القوانين الكلاسيكية تتطابق بنفس القدر مع نموذجي طومسون ورذرفورد للذرة . ولكنها مع الاسف تتطابق معهما بنفس « النجاح » . والالكترون يستهلك طاقته اثناء اشعاع الضوء ! وهو يبطئ عندئذ دورانه ، وعليه ان يسقط على النواة بسرعة هائلة تبلغ اجزاء من المليون من الثانية . وهو يشبه فى ذلك أحد التوابع الذى عندما يبطئ الحركة في المجال الجوى للارض فانه يسقط على الارض . ويكون مصير الالكترون نفس مصير التابع . فنشاهد أول الامر أحد الالكترونات يسقط على النواة ، ثم يتبعه آخر ، وهكذا حتى ينعدم وجود الذرة !

ولكننا نعرف بانه توجد فى العالم المحيط بنا ذرات تبقى لفترة طويلة جدا وترفض فكرة الفناء . وهذا يعنى انه من اجل ان تستطيع الذرة البقاء يجب على الالكترونات ان لا تصرف طاقتها وان لا تولد الاشعة الضوئية . ومع هذا فمن اين يتولد الضوء فى الاجسام لدى تسخينها ؟

ترجمة حياة الذرة كما كتبها نيلس بوهر

دخلت الفيزياء الكلاسيكية فى مأزق جديد . وكان هذا المأزق اسوأ مما كان يتصوره البعض . وبالاضافة الى ذلك فانها فشلت فى معالجة مسألة الاجسام الساخنة . ولم تستطع تفسير وجود الطيف .

ونحن نذكر قطعة القماش المغمسة فى محلول ملح الطعام . ويظهر طيف الملح ـ وهو خط اصفر وحيد ـ ، غير انه لا يوجد فى اشعاع ذرات الملح سوى طول واحد للموجات .

وحتى اذا ما افترضنا بان هذا الخط قد ولده الالكترون ذى السرعة المتباطئة فى الذرة ، فاننا نصطدم بصعوبة اخرى فورا . فان هذا الالكترون يجب ، اعتمادا على قوانين الفيزياء الكلاسيكية ، ان لا يولد خطا واحدا بل طيفا من الخطوط لكافة اطوال الموجات ، دون حدوث اية تقطعات فى هذا الطيف . ولا يجب ان يختلف طيف الالكترون عن طيف الشمس ! بينما حصلنا على خط اصفر وحيد !

وادرك بوهر بان هناك خطأ فى التقدير . ربما ان نموذج الذرة الذى وضعه رذرفورد غير صحيح ؟ كلا ، لم يحن الوقت بعد للتخلى عن هذا النموذج . وهذا ما يراه ايضا معلم بوهر نفسه ، وهو ارنست رذرفورد . فيجب محاولة تبديل شكل هذا النموذج ، واجراء تحسينات

عليه بحيث ان الالكترون الذى يدور حول النواة يستطيع توليد الضوء دون ان يسقط على النواة .

مضى عام ١٩١٢ وكانت لا تزال حيّة فى ذاكرة جميع الفيزيائيين الضجة التى احدثها اينشتين بفوتوناته . وكان اينشتين قد انتهى قبل ثلاث سنوات من وضع نظريته حول النسبية ، التى احدثت ضجة لا تقل عن ذلك . ومما لا شك فيه ان جميع هذه الهجمات على الفيزياء الكلاسيكية لم تؤد الا الى اشعال حماس الفيزيائيين الشباب ، وبثّ روح الجرأة فيهم فى اسلوب التفكير .

وواصل بوهر تأملاته . واذا به يصطدم بفكرة جديدة ، وهى : لماذا يجب على الالكترون فى الذرة ان يولد الضوء بصورة مستمرة ؟ الانه يتحرك طيلة الوقت بتسارع ؟ دعنا نتخلى عن هذا الرأى ، بل نقول ان الالكترون فى الذرة يستطيع حتى لدى حركته المتسارعة ان لا يولد الضوء !

وكيف يمكن ذلك ؟ وقد ظهر بان الالكترون يجب ان يتحرك فى الذرة لا كيفما اتفق بل فى دروب خاصة ـ مسارات ـ حول النواة . واذا لم يشع الالكترون ضوءا عليها فانه يستطيع البقاء فى الذرة الى ما لا نهاية .

لكن الفيزياء الكلاسيكية لا يمكن ان تقبل بمثل هذه الفرضية باى حال من الاحوال . وبالاخص انها لم تنطلق من اية نظرية اخرى . ولذلك عجز بوهر عن اثبات فرضيته . ولهذا السبب

فقد اطلق بوهر على فرضيته غير المثبتة هذه تسمية « مسلم » (postulate) من باب التواضع. ونشير الى ان بوهر لم يستطع اثباتها في اطار نظريته . ولم يتم اثباتها الا بعد مرور عشر سنوات ، وقد حدث ذلك بشكل غير متوقع . وسنتحدث عن ذلك فيما بعد . وما يهمنا الآن هو ان نعرف ما عدد المسارات المحتملة التي يمكن ان يتحرك فيها الالكترون دون ان يبعث ضوءا ؟ يقول بوهر بانها ربما تكون كثيرة لا تعد ولا تحصى . فما هي اذن سماتها المميزة ؟ ان متوسط المسافة الى النوى هي المسارات القريبة من النواة وكذلك البعيدة منها . لكن المسألة لا تتعلق بالمسافة قدر تعلقها بالطاقة التي يمتلكها الالكترون وهو في المسار . ومن الامور المسلم بها انه كلما قرب الالكترون من النواة كلما ازدادت طاقة حركته في المسار ، من اجل ان لا يسقط على النواة . وبالعكس فان الالكترون البعيد ينجذب الى النواة بصعوبة ، وهذا يعني بانه يستطيع الحركة بسرعة غير كبيرة من اجل البقاء في مساره .

ويتضح من ذلك بأن الدروب التي تتحرك فيها الالكترونات في الذرة تختلف باختلاف طاقة الالكترون . وحتى الآن نجد ان الالكترون يتحرك فقط دون ان يبعث اشعة ضوئية . وما دام الالكترون باقيا في مساره فان الاشعاع بالنسبة له مجرد امر محظور او « تابو » .

وعندئذ قدم بوهر المسلم الثاني . فافترض ان الالكترون كان يتحرك في مساره ثم قفز فجأة الى مسار ثاني ، ونقصت فيه طاقته

عما سبق . فاين اختفت الطاقة الزائدة ؟ ان الطاقة لا تزول ولا تتحول الى العدم .

يقول بوهر : ابحثوا عنها خارج الذرة !

فقد انفصلت عن الذرة بشكل كم . وهو نفس كم الطاقة الضوئية الذى اطلق عليه اينشتين اسم الفوتونات !

ويتحرك الالكترون المشع الآن فى مسار آخر ، ويكف عن توليد الضوء نهائيا . فقد اطلق الفوتون فى تلك اللحظة السريعة التى قفز فيها من مدار الى آخر .

اما الفوتون فانه يتوغل بين الذرات الاخرى ثم يترك اخيرا المادة . وقد يدخل فى عيوننا مباشرة . كما ويمكن مشاهدته عبر المنشور (الموشور) الزجاجى للجهاز الطيفى وتصويره على لوح فوتوغرافى . وتعانى الطاقة اكثر من تغيير ، وهى حبيسة داخل الفوتونات ، قبل ان نراها بشكل خط اسود على اللوح الفوتوغرافى !

ويعطينا هذا الخط معلومات كثيرة . فاولا ، لدى قياس وضعه على اللوح الفوتوغرافى يمكننا ان نعرف طول موجة الفوتون او تردده . وبعد ذلك تؤخذ علاقة بلانك بين تردد وطاقة الفوتون ، ثم يجرى تحديد طاقة الفوتون . وهى تساوى بالضبط الفرق فى طاقات الالكترون فى مساريه القديم و الجديد فى الذرة !

ويدلنا اسوداد اللوح الفوتوغرافى فى مكان هذا الخط الطيفى على عدد الفوتونات الساقطة فى هذا المكان ، فكلما كان عددها

اكبر كلما اصبح الخط اكثر سوادا . وكلما ازداد عدد الفوتونات كلما ازداد سطوع ولمعان الضوء المنبعث من جسمها .

فما اروع وابسط تفسير الاطياف !

هذا وان جميع ذرات اية مادة تشبه الواحدة الاخرى كقطرتى ماء . وهذا يعنى ان الالكترونات تتواجد فيها تحت ظروف متشابهة. ولهذا تكون متشابهة ايضا الفوتونات المنبعثة منها عند القفز من مسار قديم واحد الى مسار جديد واحد ايضا . وتكون جميع قفزات الالكترونات فى هذين المسارين فى خاتمة المطاف خطا طيفيا وحيدا او منفردا .

هذا وان عدد مثل هذه المسارات القديمة والجديدة بالنسبة لكل الالكترونات فى الذرات كبير جدا ، ولو انه ، كما اوردنا آنفا ، عدد له نهاية . وقد يتواجد الالكترون فى اى منها على التتابع .

وسيصاحب كل قفزة من مسار ذى طاقة اكبر الى مسار ذى طاقة اقل تولد الفوتونات . ولكن نظرا لاختلاف الفرق فى الطاقات بين مختلف المسارات ، فان الفوتونات المناظرة الناتجة تكون بطاقة وتردد مختلفين . وعندئذ يظهر على اللوح الفوتوغرافى صف من خطوط الطيف الضيقة .

وهذا ما يبدو عليه ، مثلا ، طيف الهيدروجين فى حالته الغازية . ويتألف من بضع عشرات الخطوط بموجات ذات اطوال مختلفة .

ويمكن القول بشكل عام بان الطيف البسيط ، كالذى ذكرناه اعلاه ، لذرات الصوديوم ، والمؤلف من خط واحد (اتضح فيما بعد بانه يتألف من خطين متقاربين جدا) ، هو من الامور النادرة . وتتألف الاطياف عادة من عشرات الخطوط ، وفى احيان كثيرة من آلاف الخطوط . وتبدو صورة الطيف الذى يعطيه مركب كيميائى آخر مشوشة الى درجة لا يؤمل فيها تحليله . ولكن توجد هناك قوانين يلتزم بها ، وتجعل هذه المهمة سهلة .

وكان الفيزيائيون قبل ظهور نظرية بوهر يجهدون قريحتهم فى محاولة كشف رموز بعض الاطياف المعقدة . وعندما اثبت بوهر بان الطيف ، هو ترجمة حياة الذرات ، وبتعبير ادق الكترونات الذرات ، اصبح الامر سهلا جدا بالنسبة للعلماء . وكل ما يلزم المرء هو ان يجلس ويجمع مسارات الالكترونات المختلفة حتى يحصل على الخطوط المشاهدة فى الطيف!

وبالعكس ، يستطيع المرء بدراسة الطيف ان يرسم جميع الاوضاع المحتملة التى يمكن ان توجد فيها الالكترونات . وهذا شىء هام جدا . وفى الحقيقة ان كل ما نعرفه عن الاغلفة الالكترونية للذرات هو من المعلومات التى تجمعت تدريجيا نتيجة الدراسة الدقيقة والدائبة لاطيافها .

كيف تحسب الطاقة ؟

وهكذا استطاع الفيزيائيون بفضل اعمال بوهر ان يدركوا كيف تشع الذرة الضوء . والسؤال التالى بعد « كيف » يمكن ان يكون « لماذا » . فلماذا تبدأ الاجسام بتوليد الضوء فقط عند درجة الحرارة العالية ، بينما لا تبعث الضوء فى درجة حرارة الغرفة الاعتيادية مثلا ؟

قبل ان نجيب على هذا السؤال ينبغى علينا ان ننحرف عن الموضوع قليلا . فينبغى ان نقلب رأسا على عقب الصورة المقنعة التى رسمناها للذرة . ولا تفزع ، ايها القارئ ، فكل ما ذكرناه هو صحيح ! فيما عدا نظام تتابع مسارات الالكترون .

ولنتذكر باننا اعتبرنا المسارات القريبة من النواة نشيطة ، بينما تكون البعيدة عن النواة غير نشيطة . ويتأتى من ذلك ان الفوتون يتطاير عندما يقفز الالكترون الى مسار بعيد عن النواة . ولكن واقع الحال هو العكس تماما . واليكم السبب .

لنحفر حفرة فى الارض ونضع فيها كرة . ونضع الى جانب الحفرة كرة ثانية . فأية كرة من الاثنتين تمتلك طاقة اكبر ؟

ان الشخص العارف لن ينجر الى التضليل فى هذا السؤال ، وسيقول : « هناك جانبان غير واضحين فى سؤالكم . الاول ، عن اية طاقة يجرى الحديث ؟ اهى طاقة الوضع اما الطاقة الحركية (الكينيتيكية) ؟ وثانيا ، من اى مستوى يجرى حساب

طاقة الوضع ؟ فاذا كان من مستوى الارض فان الطاقة الوضعية للكرة الموجودة فوق الحفرة يمكن ان تعتبر صفرا . ولكن فى هذه الحالة يجب ان تكون الطاقة الوضعية للكرة الموجودة فى قاع الحفرة اقل من الصفر ، اى سالبة . اما اذا جرى حساب طاقة الوضع من قاع الحفرة ، فان طاقة الوضع للكرة الموجودة فوق الحفرة تكون اكثر من الصفر . وبما ان كلتا الكرتين فى حالة السكون ، فان طاقتهما الحركية فى الحالتين تساوى الصفر » . ولنأخذ الطريقة الاولى فى الحساب .

واذا لم تكن الكرة ساكنة ، بل متحركة ؟ عندئذ تضاف الى طاقته الوضعية الطاقة الحركية ايضا . الا ان مجموع الطاقتين ، الذى يدعى بالطاقة الكلية ، سيكون كما يبدو سالبا كما هو حاله سابقا ، هذا اذا لم تقفز الكرة من الحفرة . وبالعكس ، يكون المجموع موجبا اذا ما قفزت الكرة الى الاعلى وتدحرجت على الارض .

ونحن نرجو المعذرة من القارئ على هذه الاطالة فى الشرح . لكنها فى غاية الاهمية بالنسبة لحديثنا الآن وفى المستقبل . لان وضع الالكترون فى الذرة هو من وجهة نظر الطاقة نفس وضع الكرة فى الحفرة . اما الالكترون الطليق والحر فهو كالكرة على الارض . وقد اتفق الفيزيائيون على الافتراض بحساب طاقة هذه الالكترونات باعتبار الطاقة الكلية للالكترون الحر والساكن صفرا .

فما هى اوجه الشبه بين الالكترون والكرة ؟ لا شىء تقريبا !

وبالاضافة الى ذلك فان كليهما مقيدان وحركاتهما محددة . والكرة لا تستطيع مغادرة الحفرة بنفسها ، اما الالكترون فانه لا يستطيع ان يطير من الذرة . ولهذا السبب بالذات توجد الذرات .

وكلما كانت الكرة قريبة من فتحة الحفرة ، وكلما ابتعدت عن قاعها كلما ازدادت الطاقة الكلية التى تمتلكها (وهذا يعنى نقصان هذه الطاقة فى قيمتها السالبة) . وهذا هو شأن الالكترون . فكلما ابتعد عن النواة ، كلما ازدادت طاقته الكلية . وكلما اقترب من النواة ، كلما نقصت طاقته (ولكنها طبعا اكبر فى قيمتها السالبة) .

والآن يفهم القارئ بان الالكترون عندما يقفز الى مدار قريب من النواة فان طاقته تنقص . وان الفوتونات تنطلق اثناء قفزات الالكترونات هذه بالذات . والعكس صحيح ، فكلما كان المدار بعيدا عن النواة ، كلما اصبح قريبا من « فتحة الخروج » من الذرة ، وازدادت طاقة الالكترون فيها . ولنعد الآن الى تتمة حديثنا .

الذرات الهائجة

لنعد الى قصة الكرة من جديد . فها هى ملقاة على الارض وتتساءل ببراءة : « لماذا لا اسقط ؟ » .

ولكن ما اعجب هذا السؤال ، فالى اين تسقط ؟ فاذا رميناها مثلا من اعلى السلم فانها تسقط .

ان الكترون الذرة يكون فى نفس وضع هذه الكرة عندما تكون درجة الحرارة غير عالية . فليس له من محل يقفز اليه . اذ يوجد فى اقرب المدارات الى النواة ، وليس له من مخرج سوى الانجذاب .. الى النواة . وهو شيء مستحيل استحالة سقوط الكرة خلال الارض .

وتكون طاقة الالكترون فى هذا المجال على اقلها . وهو لا يستطيع فقدان اى شيء منها بعد ذلك . وهذا يعنى بانه لا يستطيع توليد الضوء .

وينتج من ذلك ان على الالكترون اولا ان يكون موجودا فى مدار بعيد عن النواة ، ومنه يستطيع القفز الى مدار قريب منها . فكيف يتأتى وصول الالكترون الى المدار البعيد ؟ وكيف يتسنى للكرة بلوغ اعلى السلم ؟ ويتم ذلك بان نضعها هناك بانفسنا ، اى بان نكسبها شيئا من الطاقة .

وبنفس الطريقة لا يمكن ان يتم ايصال الالكترون الى المدار البعيد الا باكسابه شيئا من الطاقة . وبالمناسبة فان تعبير « شيئا » لا يفى بالغرض . فيجب اكساب الالكترون كمية من الطاقة لا تقل عن فرق الطاقة بين المدار الذى كان يتواجد فيه ، وبين المدار الذى انتقل اليه .

ويجرى اكساب الالكترون هذه الطاقة بمختلف السبل . ويتم ذلك فى غالب الاحيان عندما يحدث نتيجة الحركة الحرارية

ان « تصدم » احدى الذرات بسرعة كافية ذرة اخرى ، فتكتسب كمية الطاقة المطلوبة . وتحدث مثل هذه الاصطدامات بين الذرات كثيرا فى درجة الحرارة الاعتيادية للغرفة . لكن الطاقة تكون عندئذ ضئيلة جدا . وعندما تصل درجة الحرارة الى مئات وآلاف الدرجات فان الاصطدامات تؤدى الى حدوث تغييرات كبيرة فى الطاقة ، وتقفز الالكترونات الى مسارات جديدة .

وها هو ذا الالكترون قد بلغ مدارا بعيدا . ويبدو ان فترة الهياج قد انتهت ، وان الالكترون سيستطيع الدوران ما حلا له ذلك فى مداره الجديد حول النواة . ولكن كلا ، فان الالكترون لا يستطيع المكوث فترة طويلة فى مداره الجديد . اذ لا تسمح له النواة بذلك . فهى تحاول وتسعى لجذب الالكترون الهارب قريبا اليها ، بينما يخضع لها الاخير فيأتى صاغرا . وحالما يقفز الالكترون الى عمق الذرة — حتى يظهر الى الوجود الفوتون . وهو نفس الفوتون الذى ما ان يقع تحت ابصارنا حتى يضطرنا الى القول : « ان هذا الجسم يضىء » .

نعم ، ان الجسم يبعث ضوءا الآن . ونواصل رفع درجة الحرارة ، ونتطلع الى ما سيحدث بعد ذلك . فتصبح الحركة الحرارية للذرات اسرع فاسرع ، ويزداد اصطدامها بعضها ببعض بكثرة وبشدة اكبر . وتنقص الفترة الزمنية التى يستطيع فيها الالكترون البقاء ساكنا فى اعمق مداراته . وتتحول الذرات اكثر فاكثر الى الحالة التى يسميها الفيزيائيون افتراضا بحالة « الهيجان » . وفى اغلب الاحيان تعود

الالكترونات بعدها الى الحالة « الاعتيادية » ، من اجل ان تخرج منها فورا .

وتبدأ الفوتونات بالظهور الى الوجود عند ذلك لا وحدانا ، بل بالآلاف والملايين في الثانية . وبازدياد درجة الحرارة يتحول الجدول الرفيع من الفوتونات الى سيل ضخم منها (راجع قانون ستيفان — بولتزمان) .

ولا يزداد عندئذ عدد الفوتونات فحسب ، بل ويزداد ايضا طول قفزات الالكترونات . ويحل محل الطفرات الخفيفة من مدار الى مدار مجاور آخر وبالعكس ، قفزات كبيرة الى المدارات البعيدة عن النواة . وعندما تقفز الالكترونات راجعة فانها تولد عددا اكبر واكبر من الفوتونات السريعة . ونحن نعرف بانه كلما كانت طاقة الفوتونات اكبر ، كلما ازداد ترددها بينما ينقص طول موجتها . ولا يصبح الضوء اكثر سطوعا فحسب ، بل يكتسب لونا « بنفسجيا » اكثر وضوحا (راجع قانون وين حول الازاحة) .

وهكذا استطاعت نظرية بوهر فورا ان تقدم تفسيرا للقوانين الاساسية في نظرية الاشعاع الحراري وعلم الظواهر الطيفية . وبعد نجاحها الهائل هذا ، اصبحت واضحة تماما الطبيعة الكمّية للضوء والطبيعة الكمية للعمليات الجارية في الذرات . ولم يمض وقت طويل حتى اعترف غالبية العلماء بها .

اولى الهزائم

ان الحديث عن الانتصار الشامل لنظرية بوهر شيء سابق لاوانه .

وكانت السنوات العشر التى تلت ظهور النظرية قد شهدت التطور الهائل لها . فاستوعبت عددا كبيرا من الظواهر ، منها العمليات الدقيقة جدا لتوليد الذرات للضوء وابتلاعه ، والبناء الدقيق للذرات والجزيئات . وفى عام ١٩١٤ قام العالم كوسيل (Kossel) بوضع اسس كيمياء الكم التى يرد ذكرها فى جميع كتب الكيمياء المدرسية . وفى عام ١٩١٦ قدم زومرفيلد (Sommerfeld) نظرية اكثر دقة حول نشوء الاطياف الذرية ، والتى لا زالت مستخدمة حتى يومنا هذا فى فك رموز اعقد اشكال الطيف . وتفسر فى نطاق النظرية الجديدة الصفات المغناطيسية والكهربائية للذرات والجزيئات ، التى اكتشفت آنذاك .

وفى الوقت نفسه قابلت نظرية بوهر صعوبات كثيرة . ولم تكن قادرة على تفسير الكثير من الحقائق الجديدة ، وبعضها كانت العامل الذى قاد الى اكتشافها .

وقد تبين بان اولى تلك الصعوبات تكمن فى الاطياف ، التى ساعدت نظرية بوهر كثيرا على شرح كيفية نشوئها ! نعم ، هذا صحيح . لكن هذا الشرح ، كما سنرى ، لم يكن كافيا .

لقد ذكرنا بان خطوط الطيف تتميز لا بطول موجاتها بل وبسطوعها ايضا . وقد امكن بواسطة نظرية بوهر ايجاد المسافة بين درجات سلالم الطاقة فى المسارات الالكترونية للذرة ، اى طول موجات الفوتونات ، المتولدة عن حدوث قفزات الالكترونات من درجة الى درجة فى هذه السلالم . ولم تقدم النظرية اية تفسيرات حول تحديد سطوع خطوط الطيف . كما بقى غير واضح ايضا كيفية حساب عدد الفوتونات فى الطيف .

لذلك فقد يكون امرا سابقا لاوانه التهليل لانتصار نظرية بوهر على الفيزياء الكلاسيكية ! وعمدت نظرية بوهر بعد طرد « النظرية القديمة » من الباب الواسع الى السماح لها بالدخول من الباب الخلفى . وقد اضطر لعمل ذلك بوهر نفسه بمساعدة ما يسمى بمبدأ التناظر (correspondence principle) .

فما هو هذا المبدأ ؟ لقد استطاعت الفيزياء الكلاسيكية حساب درجة سطوع الطيف ، بالرغم من انها لم تستطع تفسير سبب نشوئه . اما ميكانيكا الكم فقد فسرت جوهر الاطياف دون ان تستطيع حساب درجة سطوع خطوط الطيف . واستنتج بوهر من ذلك بانه يجب استعمال كلتا النظريتين ، القديمة والجديدة بجمعهما سوية . وينبغى تحقيق ذلك فى المجال الذى تتفق فيه هاتان النظريتان .

فاين يتحقق ذلك ؟ ان الالكترون بموجب قوانين الفيزياء الكلاسيكية يدور حول النواة ، ويقترب منها على الدوام ،

حتى يسقط عليها . وعند ذلك فانه يولد ، كما اشرنا آنفا ، طيفا متصلا ، لا وجود فيه حتى لشبح الخطوط المنفصلة .

بينما نجد بموجب ميكانيكا الكم ان الالكترون في الذرة يقوم بتوليد الاشعاع في خطوط منفصلة ، او كما يقال في طيف متقطع . وقد تبين ان هناك شيء يجمع بين الطيفين .

ان درجات سلم الطاقة في المسارات الالكترونية تكون ذات ارتفاعات مختلفة . وكلما كانت اقل كلما كان المسار ابعد عن النواة . ويكون شكل سلم الطاقة في الذرة اشبه بسلم اعتيادي طويل اذا ما نظر اليه من اسفل الى اعلى . واذا ما تطلع المرء الى السلم يلاحظ بان درجاته تبدو متقاربة ثم تندمج سوية . والفرق بين المثلين هو ان تقارب درجات السلم الحقيقي هو مجرد خداع نظر مبعثه ابتعاد المنظور ، اما في الذرة فان التقارب الحاصل هو تقارب حقيقي .

لكن ارتفاع درجة الطاقة تناظر طاقة الفوتون او طول موجة خط طيفه . وبذلك فان خطوط الطيف ذات الموجات الطويلة ، التي تناسب قفزات الالكترون بين المسارات البعيدة عن النواة ، يجب ان تكون قريبة من بعضها البعض . الامر الذي يجعلها تبدو بشكل طيف متصل .

وهذا يعني بان قسم الطيف « الكمي » ذي الموجات الطولية يجب ان لا يختلف عمليا ، وبشكل جوهري ، عن قسم الطيف « الكلاسيكي » . وكان بالمستطاع محاولة حساب درجة السطوع

للطيف الاول فى هذا القسم اعتمادا على قوانين الفيزياء الكلاسيكية ، ثم استخدام هذا الحساب فى كل الطيف « الكمى » . وهذا هو اساس مبدأ التناظر .

والحق ان هذه فكرة ذكية . وقد جرب تطبيقها عمليا ... لكن الفيزيائيين لم يفلحوا فى ذلك . واعطت التجارب خطا ساطعا واحدا ، بينما تعطى النظرية نتيجة مختلفة تماما .

وبشكل عام لم يكن من السهل توقع اى شيء آخر . فالنظرية التى تعجز عن تفسير ظاهرة ما ، بدون مساعدة خارجية ، هى نظرية غير قوية اطلاقا . ناهيك عن اللجوء الى مساعدة نظرية اخرى عارضتها هى نفسها .

ان ادخال افكار الفيزياء الكلاسيكية فى ميكانيكا الكمّ ، هو كما قال الفيزيائى الانجليزى براج (Bragg) ذات مرة هازلا ، يشبه الوعظ بـ « العقيدة الكلاسيكية » فى ايام الاثنين والاربعاء والجمعة ، وبـ « عقيدة ميكانيكا الكمّ » فى ايام الثلاثاء والخميس والسبت . وبالرغم من ان العلم يرضى بازدواج عقيدتين ، ويعتبره امرا مفيدا احيانا ، لكنه فى الواقع دليل على ضعف النظرية .

واذا ما درسنا النظرية الجديدة باكثر دقة ، فانه يتبين لنا بان مبدأ التناظر لم يكن نقطة الضعف الوحيدة فى نظرية بوهر . وفى الواقع انها كانت تحمل ، منذ بدايتها ، وفى كافة فرضياتها الاساسية طابع الفيزياء الكلاسيكية بشكل واضح .

لقد رفضت نظرية بوهر التصورات الكلاسيكية حول حركة الالكترون . وفى الوقت نفسه طرحت مفهوم مسارات الالكترون فى الذرة . وكانت تعتقد بكل جدّ ان الالكترون يدور حول النواة فى الذرة ، كما تدور الارض حول الشمس من وجهة النظر الفيزيائية .

كما « حـرّم » بوهر على الالكترون ان يولد اشعاعا اثناء تواجده فى المسار ، لكنه لم يستطع تقديم اى تبرير لهذا التحريم . وقد شرحت نظرية بوهر بشكل صحيح كيف تظهر الفوتونات فى الذرات ، لكن العملية نفسها بقيت غامضة بالنسبة لها تماما . ولم تقدم لها مسلماته اى تفسير .

وكان لا بد من ظهور هذه الطبيعة الازدواجية لنظرية بوهر عاجلا او آجلا . وسرعان ما انحسرت امام الحقائق الجديدة التى رفضت حصرها ضمن نطاق النظرية . لكنها تميزت ببعض الفضائل .

فقد كانت نظرية بوهر خطوة كبيرة الى الامام من اجل تفهم وادراك عالم الذرات . لكنها خطوة محدودة . وقد اعطت التفسير لكثير من الظواهر التى عجزت الفيزياء الكلاسيكية عن ايضاحها ، بل وكانت خارج نطاقها . ومع ذلك فقد عجزت هى ايضا عن ايضاح امور كثيرة .

وها قد حان اوان القيام بخطوات جديدة .

وقد قام باولى هذه الخطوات العالم الفيزيائى الفرنسى لويس دى برويل (Louis de Broglie) .

من نظرية بوهر ..
الى ميكانيكا الكّم

مقالة عجيبة

ظهرت فى عدد سبتمبر عام ١٩٢٤ من المجلة الفيزيائية الانجليزية « المجلة الفلسفية » (Philosophical magazine) مقالة بتوقيع فيزيائى غير معروف هو لويس دى برويل . وقد اورد كاتب المقالة فيها بعض موضوعات بحثه المكرّس لاحتمال وجود موجات المواد .

موجات المادة ؟ اليست هى ما يعرف بالموجات الصوتية والضوئية وغيرها من الموجات التى سماها الفيزيائيون منذ قديم الزمان « باسمائها » ، تلك الموجات المادية تماما ، والتى تتحسسها اعضاء الحسّ لدى الانسان ، او تسجلها الاجهزة ؟

كلا ، لقد تبين بان الكلام يدور فى تلك المقالة حول موجات اخرى تماما . وكانت الافكار التى اوردها دى برويل غير عادية ومتناقضة حتى يمكنها ان تنافس تماما الفكرة التى اوردها بلانك حول كمات الطاقة قبل ربع قرن من الزمان . ولا يتعلق ذلك باهميتها

بالنسبة للفيزياء فحسب ، بل وبما أبداه عدد كبير جدا من الفيزيائيين من شكوك تجاهها علانية .

فما هي موجات المادة ؟

قبل البدء بالحديث عنها ينبغي علينا التوقف قليلا للكلام باختصار عن الموجات « الاعتيادية » . فقد جرت دراسة هذه الموجات بصورة طيبة حتى الوقت الذى نشر فيه لويس دى برويل مقالته .

كلمات موجزة حول الموجات الاعتيادية

ارم حجرا فى بركة ماء ، وراقب حلقات الموجات السطحية المتكونة على البركة . وبالمناسبة فان الموجات السطحية هى الموجات الوحيدة التى يمكن مشاهدتها عمليا اثناء حركتها .

وقد يبدو بان الماء نفسه يتحرك مبتعدا عن الحجر . لكن الامر ليس كذلك . فمن منكم لم يحاول فى الطفولة جذب الزورق المصنوع من الورق الى الضفة لدى ابتعاده عنها فى احدى البرك ؟ وكانت قريحتنا الطفولية تعلمنا بان المخرج الوحيد هو برمى الاحجار فى الماء وراء الزورق .

وكان يحدث ان الموجات تمرّ من تحت الزورق ، بينما يبقى متأرجحا فى مكانه الى اعلى واسفل ، دون ان يتحرك من مكانه . وهذا يعنى بان الماء الذى اثاره سقوط الحجر ، لا يتحرك من مكان السقوط ، ويكتفى بالاهتزاز فى الموجة الى اعلى واسفل .

ومع ذلك ، ففى الموجات العالية التى يبعثها سقوط الاحجار الكبيرة يبتعد الماء عن الحجر ولو لمسافة ضئيلة فى كل مرة . فاذا ما تحلى الصبى بالصبر وكان لديه احتياطى من الاحجار ، فانه سيتمكن فى نهاية الامر من جذب الزورق الى الشاطئ .

ان هذه الصفة « المميزة » للموجات السطحية العالية تستخدم بمهارة كبيرة من قبل هواة رياضة طريفة منتشرة فى اوستراليا . فيخرج الرياضيون الى عرض البحر عندما تظهر فيه أمواج ضخمة منتظمة . ثم يتركون زوارقهم الى لوحات عائمة فيقفون عليها لحين مجيء موجة عالية . « فيمتطون » هذه الموجة التى تحملهم الى الشاطئ بسرعة تقارب من سرعة القطار السريع ! ولكن لدى حدوث اية حركة غير دقيقة فان الرياضى يجد نفسه لا فوق قمة الموجة بل فى قاعها ، فتغمره الموجة كليا .

وتلعب الموجة فى هذه الرياضة الخطيرة والمثيرة دور حامل الرياضى ، وهى تحلق به نحو الشاطئ . وتذكروا هذه العبارة : « الموجة — الطيار » . فسنعود اليها فيما بعد .

وقد اوضح الفيزيائيون فى القرن الماضى بان الصوت ايضا عبارة عن حركة موجية . ويمكن للموجات الصوتية ان تنتشر فى الهواء والماء وفى الاجسام الصلبة . فما هو الذى يهتز فى الموجات الصوتية ؟ انه جسيمات الوسط الذى تنتشر خلاله الموجات — وهى جزيئات الهواء والماء وذرات المواد الصلبة .

ولكن اذا ما ازيل الهواء والماء والارض فان موجات الصوت تختفي . وينعدم الصوت فى الفضاء الخالى من الهواء . ومن المتوقع ان يشاهد ملاحو النجوم في المستقبل مناظر فريدة لا مثيل لها ، كالثورانات الهائلة للبراكين فى الكواكب البعيدة التي ينعدم فيها الهواء .. وهى ثورانات تجرى فى صمت مطبق ! فلا يشعروا سوى بالارض تتحرك تحت اقدامهم ! كما ان هدير محركات الصاروخ الكونى الذى يصم الاذان على الارض ينعدم كليا على القمر .

وقد استطاع الفيزيائيون فى القرن الماضى ادراك طبيعة الموجات الكهرومغناطيسية الناجمة عن حركة الشحنات الكهربائية .

ان الضوء والموجات اللاسلكية تصل الى الارض من النجوم والسدم ، والتى بدأت رحلتها قبل آلاف وملايين السنين . وتجتاز فى طريقها الفضاء الفارغ الهائل الذى يفصل بين النجوم . وسيشاهد ملاحو النجوم على سطح القمر ، ووسط السكون التام ، السنة اللهب التي تعمى الابصار ، المنطلقة من اسفل الصاروخ الكونى .

وهذا يعنى بان المرء يستطيع فى الفراغ ان يرى دون ان يسمع . وفى ذلك يكمن الفرق الجوهرى بين الموجات الكهرومغناطيسية والميكانيكية ، ومنها الموجات الصوتية . فلا يتطلب انتشار الموجات الكهرومغناطيسية وجود وسط بينى . بل بالعكس فان هذا الوسط يؤخر حركتها .

التعرف على « موجات المادة »

ولنعد الى « موجات المادة » .

يؤكد دى برويل فى مقالته بان هذه الموجات تستمر لدى حركة اى جسم سواء اكان كوكبا ام حجرا ام دقيقة غبار او الكترونا . وهذه الموجات قادرة ، مثلها مثل الموجات الكهرومغناطيسية ، على الانتشار فى الفراغ التام . وهذا يعنى بانها موجات ميكانيكية .

ولكنها يمكن ان تتواجد عند حركة جميع الاجسام ، وبضمنها الاجسام غير المشحونة كهربائيا . وهذا يعنى بانها ليست موجات كهرومغناطيسية .

ولم تعرف الفيزياء آنذاك انواعا اخرى من الموجات . ونستنتج من ذلك بان « موجات المادة » هى حقا موجات جديدة لم تعرف من قبل . لكن الفيزيائيين القدماء هزوا رؤوسهم استخفافا وقالوا بان ذلك محض هراء مطبق .

فقدا ايقنوا كل اليقين بان جميع الموجات ، التى يمكن ان توجد فى الكون ، معروفة تماما فى الفيزياء . بينما يتحدث الشاب لويس دى برويل هذا عن موجات المادة ، ولكن اليس الموجات الميكانيكية والكهرومغناطيسية هى موجات مادية ؟ فبدون المادة لا تنعدم الموجات فقط ، بل كل شىء فى الكون !

والحقيقة ان دى برويل اختار لموجاته اسما غير موفق تماما .

ولكن ما العمل ؟ فالظواهر المكتشفة غالبا ما تأخذ أسماءها قبل ان يتسنى للعلماء انفسهم فهم جوهرها بشكل صحيح .

وهذا ما حدث لدى برويل . فان جوهر « موجات المادة » قد بدا غير اعتيادى ومعقدا الى درجة ان الفيزيائيين قد دخلوا فى مناقشات حامية حوله ، ولا زالوا حتى يومنا هذا يواصلون النقاش والجدال !

ولابد لنا من التعرف على هذا الجوهر عن قرب . لان فكرة دى برويل بالذات هى التى اصبحت اساس ميكانيكا الكم الحديثة .

لماذا لا نلاحظ موجات دى برويل ؟

ربما كان هذا السؤال هو اول الاسئلة التى وجهها الفيزيائيون المشككون الى دى برويل . ومن الافضل لنا البدء بالاجابة عليه من السؤال التالى : وكيف نلاحظ الموجات عموما ؟ ان الحديث لا يدور هنا ، طبعا ، عن اعضاء الحس لدينا فقط ، التى هى على كل حال وسائل غير قوية للحس نسبيا .

فان اذن الانسان تلتقط الاصوات بتردد يقارب ٢٠ الى ١٦٠٠٠ ذبذبة فى الثانية . وتطابق هذه الترددات اطوال الموجات الصوتية فى الهواء التى تتراوح من حوالى ١٧ مترا الى سنتيمترين . وتتأثر عين الانسان بالموجات الضوئية التى يتراوح طولها ما بين ٤ر٠ و٨ر٠ ميكرون . وهذه هى « النوافذ » التى توفرها لنا الطبيعة من اجل تفهم

الموجات (اذا لم نأخذ بنظر الاعتبار ، طبعا ، الموجات السطحية ، مثل موجات مياه البحر) .

ويحول الفيزيائيون بواسطة اجهزة خاصة الموجات التى لا تلتقطها حواس الانسان ، الى موجات تدخل اطوالها ضمن نطاق « النافذتين » المذكورتين . ويساعد ذلك على توسيع مجالات ادراك الظواهر الموجية بالنسبة لنا الى حد كبير . فيمكن بواسطة اجهزة الراديو التقاط ودراسة الموجات اللاسلكية التى يبلغ طولها عدة امتار وسنتيمترات ، والقادمة الى الارض من اعماق الكون . وتتيح لنا عدادات الومضان * (scintillation counters) امكانية البحث عن اشعة جاما المنبعثة من نوى الذرات . وهى موجات كهرومغناطيسية يبلغ طولها حوالى جزء من المليار من المليمتر .

وكما نرى فان مجال اطوال الموجات المدروسة كبير حقا . فلماذا اذن لم يتسن التقاط موجات دى برويل ؟

ولكن كيف يتم التقاطها ؟ فمثلا ، يمكن ان تلتقط حاسة السمع لدى الانسان الموجات الصوتية الميكانيكية التى يبلغ طولها عدة امتار . الا ان هذه الموجات نفسها لا يمكن ان تلتقط بواسطة جهاز الراديو حتى لو نصب على طول الموجة المطلوبة . فهو لا يلتقط الا الموجات

---

* تستخدم فى عداد الومضان بلورات خاصة لتسجيل الجسيمات النووية وكمات جاما (gamma quanta) . فعند سقوط جسيمات او كمات الاشعاع عليها يتولد وميض من الضوء ، يجرى تسجيله بواسطة الاجهزة الحساسة .

اللاسلكية . وبالعكس فاننا نجد هذه الموجات التى يصل طولها الى عدة امتار لا تلتقط بواسطة الاذن او اى جهاز ميكانيكى آخر .

وان كل نوع من وسائل الاستقبال يستجيب لانواع الموجات الموافقة له فقط : فالاذن تستقبل الموجات الصوتية ، والعين تستقبل الموجات الكهرومغناطيسية . فبأى شىء اذن يمكن ان تلتقط موجات دى برويل ؟ فهى ليست من هذا النوع ولا ذاك !

وهذا هو فى الواقع الجواب الاول للسؤال المطروح اعلاه . وستجدون الجواب الشافى فيما يلى من حديثنا .

ونحصل على الجواب الثانى اذا ما حاولنا ان نعرف طول « موجات المادة » . وقد حصل دى بروبل على العلاقة التى تربط بين طول الموجات الجديدة مع الكتلة وسرعة الاجسام المتحركة . ويمكن صياغتها بالشكل التالى :

$$\lambda = \frac{h}{\text{ك} \times \text{ع}}$$

وفى هذه العلاقة ترمز λ الى طول موجة دى برويل و (ك) الى كتلة الجسم و (ع) الى سرعته ، اما (h) فهى ثابت بلانك الذى مرّ بنا سابقا .

ووجود هذه العلامة هنا أمر فى غاية الاهمية . اذ يثبت ذلك بان لموجات دى برويل طبيعة كمية خاصة حقا . وسنتطرق الى هذه المسألة الهامة فيما بعد ، اما الآن فسنكتفى بايضاح اى من

اطوال الموجات تطابق حسب فكرة دى برويل حركة الاجسام المحيطة بنا . ولنجرى حسابا بسيطا على كوكب وحجر والكترون .

ولكن يظهر لنا مقدما وقبل ان نلجأ الى الارقام بان اطوال هذه الموجات يجب ان تكون ضئيلة جدا . لان البسط فى علاقة دى برويل يحتوى على ثابت بلانك الذى هو مقدار صغير جدا وهو : $٦٫٦ \times ١٠^{-٢٧}$ ارج فى الثانية .

ولنأخذ الارض كمثال على الكوكب . فان كتلتها تبلغ ٦×١٠^{٢٧} جرام ، اما سرعتها فى مدارها حول الشمس فتبلغ حوالى ٣×١٠^{٦} سنتيمتر فى الثانية . وبوضع هذه الارقام فى علاقة دى برويل نجد ان طول موجة الارض هى :

$$\lambda = \frac{٦٫٦ \times ١٠^{-٢٧}}{٦ \times ١٠^{٢٧} \times ٣ \times ١٠^{٦}} = ٣٫٦ \times ١٠^{-٦١} \text{ سنتيمتر}$$

وهو مقدار فى غاية الصغر ! ولا يأمل احد طبعا فى امكانية تسجيل موجة بهذا الطول باى من الاجهزة المتوفرة حاليا او التى ستصنع فى المستقبل ! ولا تجدى اية مقارنات نفعا فى تحسس مدى ضآلة هذا المقدار .

ولنر اذن الآن كيف الحال لدى حساب طول موجة الحجر .

لنفرض انه رمى حجر وزنه ١٠٠ جرام بسرعة ١٠٠ سنتيمتر فى الثانية : فبموجب معادلة دى برويل نجد ان :

$$\lambda = \frac{٦,٦ \times ١٠^{-٢٧}}{١٠٠ \times ١٠٠} = ٦,٦ \times ١٠^{-٣١}$$ سنتيمتر

وهذه الحالة ليست خيرا من حال موجة دى برويل الارضية ! فان محاولة تسجيل مثل هذه الموجة امر لا جدوى منه ايضا ! فطول الموجة هذا هو اصغر بمليار مليارات المرات من حجم اصغر شيء لا يمكن رؤيته باقوى الميكروسكوبات مثل نواة الذرة .

ولننتقل الآن الى الالكترون . فكتلته تساوى $١٠^{-٢٧}$ جرام تقريبا . فاذا ما بدأ الالكترون بالحركة فى مجال كهربائى بفرق فى الجهد يبلغ فولطا واحدا ، فانه سيكتسب بعد ذلك سرعة تصل الى ٦×١٠^{٧} سنتيمتر فى الثانية . وبتطبيق هذه الارقام فى معادلة دى برويل نحصل على ما يلى :

$$\lambda = \frac{٦,٦ \times ١٠^{-٢٧}}{٦ \times ١٠^{٧} \times ١٠^{-٢٧}} = ١٠^{-٧}$$ سنتيمتر

وهذا امر مختلف تماما . فان المقدار $١٠^{-٧}$ سنتيمتر يعادل اطوال اشعة رونتجن مثلا ، وقد استطاع العلماء تسجيلها . وهذا يعنى بانه من الممكن من حيث المبدأ كشف موجة دى برويل الالكترونية .

العثور على الموجة

ولكن كيف يمكن تحقيق ذلك ؟

ان المسألة ليست بهذه البساطة . ويقول المثل المشهور « العقل يرى والعين لا تبصر » ، فاذا ما اعدنا صياغة هذا المثل نقول بان موجة دى برويل موجودة فى النظرية ، لكن ليس بمقدرة اى عين او جهاز معروف ملاحظتها . وكما قلنا فانها بطبيعتها يجب ان تفلت من جميع وسائل استقبال الموجات المعروفة .

ولكن هذا يجب ان لا يقعدنا عن العمل . فالموجة هى موجة . ولابد من ان توجد ظاهرة ما تبدى فيها الموجة — مهما كانت صفاتها — الخصائص المميزة لها . فقرر العلماء محاولة الكشف عن موجة دى برويل فى ظاهرة معروفة منذ القدم وهى الحيود (diffraction) .

فالحيود هى ظاهرة موجية بحتة . وتتلخص فى ان الموجة عندما تلتقى بحاجز ما تحيد عنه . وعندها تنحرف الموجة عن خط سيرها المستقيم وتدخل جزئيا فى « الظل » وراء هذا الحاجز .

وتتميز ظاهرة حيود الموجات ، عن الحاجز الكروى او الفتحة الدائرية فى شاشة غير شفافة بالنسبة للموجات ، بشكل متميز لنظام الحلقات المعتمة والمضيئة المتناوبة . ويمكن ملاحظتها ، مثلا ، لدى التحديق فى النور الموجود فى الشارع عبر زجاج مغطى بالغبار . وفى ليالى البرد القارص تتكون حول القمر مجموعة من الحلقات المعتمة

والمضيئة ، وسببها حيود ضوء القمر عند مروره خلال بلورات الجليد الدقيقة المتطايرة في الهواء .

ويمكن القول في اى مكان تلاحظ فيه ظاهرة الحيود دون تردد بان هناك موجات ! وكان اكتشاف ظاهرة حيود الضوء في بداية القرن التاسع عشر من اكثر الحجج اقناعا في صالح النظرية الموجية للضوء .

ومع ذلك فان اطوال الموجات الضوئية تزيد بمئات وآلا ف المرات على ما يجب ان يكون عليه طول موجات دى برويل الالكترونية . وقد ظهر بان جميع الاختراعات التى استنبطت لتكوين حيود الضوء ، من شقوق وشاشات وشبكات حيود ، هى غليظة جدا . لان مقاييس الحواجز التى يلاحظ فيها حيود الموجات يجب ان تكون متناسبة مع طول الموجة او أقل منها . وما يصلح في الموجات الضوئية يغدو عديم الفائدة بالنسبة لموجات دى برويل .

فبأى الاجسام تمكن محاولة العثور او ملاحظة حيود موجات دى برويل الالكترونية ؟ وقد عرفت هذه الاجسام حتى عام ١٩٢٤ . وقبل اثنى عشر عاما من ذلك الوقت لاحظ العالم الالمانى لاوه (Laue) ظاهرة حيود اشعة رونتجن لدى مرورها بالبلورات . فشاهد لاوه على اللوح الفوتوغرافى ، الذى عرّض لاشعة رونتجن المارة عبر البلور ، عددا من البقع المعتمة والفاتحة . وبعد بضع سنين اعاد العالمان ديبيه (Debye) وشيرر (Scherer) تجربة لاوه مع استخدام عينات

من مساحيق ذات بلورات دقيقة ، فحصلا على حلقات الحيود نفسها . وقد تبين فى هذه الحالات بان الحيود اصبح ممكنا لان المسافات بين الذرات فى البلورات (عملت عمل « الشقوق » فى « الشاشة » غير الشفافة بالنسبة لاشعة رونتجن) كانت بنفس المقدار الذى لطول موجات اشعة رونتجن وهو 10^{-8} سنتيمتر .

لكن طول موجات دى برويل للالكترونات يقع ضمن هذا المقدار ! وهذا يعنى بانه اذا ما وجدت هذه الموجات حقا فان الالكترونات لدى مرورها بالبلورات يجب ان تولد نفس الشكل من الحيود على اللوح الفوتوغرافى الذى ولدته اشعة رونتجن .

وبعد مرور عدة سنوات على تقديم دى برويل لفكرته اثبتها بالتجربة كلا من العالمين الاميركيين دافيسون (Davisson) وجيرمر (Germer) والفيزيائى السوفييتى ر . تارتاكوفسكى ، وذلك لدى اجرائهم تجربة حيود الالكترونات عند امرارها عبر البلورات .

وعلى اى حال فان المقارنة بين الاشعة « الالكترونية » وأشعة رونتجن بدت غير كافية . وتطلب اجراء التجربة قوة ابداع كبيرة وذكاء حادا .

فان اشعة رونتجن مرت عبر البلورات دون عائق تقريبا . اما الالكترونات فقد امتصت كليا فى طبقة من البلورات لا يزيد سمكها على جزء من المليمتر . لذلك فقد تطلب الامر استخدام لوحات بلورية رقيقة مثل الرقائق المعدنية ، او العمل — على حد تعبير

نمط أشعة رونتجن

شكل ١



شكل ٢

الفيزيائيين ــ باستخدام الحواجز لا الفتحات . وفى هذه الحالة تتجه الحزمة الالكترونية بزاوية صغيرة نحو جانب البلورة بحيث ان الالكترونات لا تنفذ الى داخل البلورة بل تنعكس عنها ، كما لو كانت منزلقة عنها . وفى النتيجة حدث حيود الالكترونات فقط فى ذرات الطبقات السطحية من البلورة . وقد استخدمت اللوحات الفوتوغرافية لتسجيل الالكترونات التى تعرضت للحيود .

وقد وجه تارتاكوفسكى حزمة من الالكترونات على رقيقة (foil) خفيفة جدا مؤلفة من عدد من البلورات الدقيقة ... لمدة بضع دقائق .

ثم أخذ اللوح الفوتوغرافى بعد تعريضه الى حزمة الالكترونات

الى غرفة التحميض المعتمة ووضع فى المظهر . فظهرت شيئا فشيئا وببطء ملامح الصورة المنطبعة عليه . ويزداد نفاذ صبر العلماء . فيرفعوا اللوح قبل انتهاء عملية الاظهار (التحميض) او يضعوه امام الضوء ...

لقد ظهرت حلقات الحيود !

انها حلقات ضعيفة لا تكاد ترى بالعين المجردة ، لكنها جلبت اعظم السرور الى قلوب العلماء . فارسلت هذه اللوحات الاولى ، وكأنها كنز ذى قيمة عظيمة ، الى اكبر مختبرات العالم . فتجرى دراستها بدقة وتمحيص . ولم يعد هناك مجالا لاية شكوك . فقد اثبتت بالتجربة فرضية دى برويل حول « موجات المادة » بشكل رائع . واصبح بالامكان اكتشاف وجود الالكترونات لا اعتمادا على صفة الجسيمات بل وعلى صفاتها الموجية ايضا !

الجسيمات ذات الوجهين

العلماء من الناس الذين لا يعرفون الصبر . ونراهم يحاولون ادراك جوهر موجات دى برويل قبل تحقيق هذه التجارب الحاسمة . فكيف يمكننا ان نتصور السلوك « المزدوج » للجسيمات ، ومنها الالكترونات ؟

وكان الفيزيائيون آنذاك يدركون معنى ما يقصدونه من كلمة « الكترون » . وهو عبارة عن جسيم للمادة صغير وخفيف جدا ،

يحمل شحنة كهربائية صغيرة ايضا . ولم يتساءل احد لفترة طويلة من الزمن عن شكل هذا الجسيم وماذا يجرى فى داخله . ولم يمتلك العلماء اية وسائل لمشاهدة الالكترون بالعين المجردة ، نا هيك عن التغلغل الى تركيبه الداخلى .

ولكن بما ان الالكترون جسيم ، فمن المفروض ان تكون له صفاته فقط ! اذن فمن اين اكتسب الالكترون صفات مختلفة اخرى تناقض الاولى ، وهى الصفات الموجية ؟

وكان اول من حاول ادراك جوهر « موجات المادة » هو دى برويل نفسه . فقد اشار بجلاء الى انه عندما يتغلغل الفيزيائيون الى عالم الاشياء المتناهية فى الصغر ، فانهم بحكم العادة يواصلون « التمسك » بالتصورات والنماذج الواضحة . فالذرة بموجب نظرية بوهر — رذرفورد يمكن تصويرها بما يشبه نظام الكواكب ، حيث تدور الكواكب — الالكترونات حول الشمس — النواة ، الا انها تختلف عن الكواكب فى كونها تستطيع من وقت لآخر تغيير مساراتها .

ولكن ماذا يمكننا القول عن الكمّ الضوئى اى الفوتون ؟ فهو يتسم ايضا ، كما اشار اينشتين ، بصفات الموجات والجسيمات . فكيف كان بالامكان تصور مثل هذا الشيء المزدوج ؟ ومن الواضح انه من غير المعقول محاولة تصور نموذج مفهوم !

وهكذا ظهر فى الفيزياء اول شيء « غير قابل للتصور » . والآن ، بعد اكتشاف دى برويل ، وجب ان تطبق على جسيمات

المادة ظاهرة عدم القابلية للتصور — ابتداء من الالكترون الدقيق جدا الى الاجرام السماوية الضخمة ! وقد كان ذلك امر يجب التراجع فيه حقا .

وكيف يستطيع المرء ان يتصور الالكترون الطائر نحو حاجز وقد دار حوله نتيجة للحيود ، ثم اتخذ مكانه خلفه . كلا ان الموجة والجسيم هما شيئان متناقضان ينفيان الواحد الآخر . فالشيء قد يكون اما موجة واما جسيما !

ومع ذلك فان موجات دى برويل لازالت باقية . وهذا يعنى بان محل « اما ... واما » ستحل « و.... و » (اى كلاهما) . وكان لا بد من عمل شيء للجمع بين ما لا يجمع سوية . ولا ينطبق ذلك على حالة مفردة وهى حيود الالكترون . فاذا كان الالكترون يتسم بصفات موجية ، فلا بد من ان تتسم بها كافة الاشياء فى عالمنا ، من اصغرها الى اكبرها .

وقد اقترح دى برويل البدء بهذا التركيب غير الاعتيادى من مفهوم « الموجة — الطيار » .

« الموجة — الطيار »

لنعد ثانية الى رياضة التزحلق على الامواج . فالرياضى يقفز الى قمة الموجة العالية التى تحمله الى الساحل . وعندها نجد ان الموجة تقوم بدور الطيار فتحلق باللوحة التى يمتطيها الرياضى .

وتتلخص فكرة دى برويل فى ان « موجات المادة » تحلق بالجسيمات المتحركة للشىء بطريقة مشابهة فى المظهر . فيبدو كما لو أن الجسيم يجلس فى الموجة وكأنه فى مقعد مريح ، ويتحرك الى المكان الذى تحمله اليه « موجة المادة » .

ويقول دى برويل بان طول هذه الموجات قد يكون كبيرا جدا . ففى السرعات الكبيرة للحركة يكون طول الموجة الالكترونية اكثر بآلاف المرات من « حجمها » . فبازدياد السرعة يقوم الجسيم بسحب الموجة الى داخله ، فتصبح أقصر . ولكن حتى اثناء السرعات العالية جدا فان طول الموجة الالكترونية يكون اقل بعشرات المرات من « حجم » الالكترون نفسه .

ولا يهم فى الحقيقة من يقود او يحمل الآخر ــ الالكترون للموجة أم الموجة للالكترون . فالمهم هو ان هذه الموجة ترتبط بالالكترون برباط وثيق والى أبد الابدين . وليس الالكترون رياضيا يستطيع ركوب الموجة والقفز منها فى اية لحظة يشاء . فالموجة الالكترونية تختفى حالما يتوقف الالكترون . وفى هذه اللحظة يتحول المقام فى علاقة دى برويل الى الصفر ، وطول الموجة الى مالانهاية . وبكلمة اخرى فان قمة وقاع الموجة يبتعدان الواحد عن الآخر الى درجة تكف فيها الموجة الالكترونية عن كونها موجة .

وعلى اى حال ، اننا لا نستطيع منع تصور دى برويل عن اكتساب شىء من الوضوح . فيمكن حتى رسم الالكترون الراكب

موجته الخاصة على الورق . لكن من اين جاءت هذه الموجة ؟ انها توجد مع الجسيم حتى فى تلك الحالة عندما تتحرك الاخيرة فى الفراغ المطلق . وهذا يعنى بان الموجة يمكن ان تتولد من الجسيم نفسه . فكيف يحدث ذلك ؟

ولا تعطينا فرضية دى برويل اية معلومات بهذا الشأن . حسنا ، لربما تفسر الفرضية العلاقة المتبادلة بين الجسيم والموجة ، وكيف تتحرك الموجة سوية مع الجسيم ، وكيف انها تشارك الاخير مصيره فى علاقاته المتبادلة مع الجسيمات الاخرى والحقول ، كما يحدث ، مثلا ، عندما تصطدم الجسيمات بحاجز او لوح فوتوغرافى . كلا ، ان الفرضية لا توضح ذلك بشكل مقنع وكاف .

وحاول دى برويل فى بحثه عن مخرج من هذا الوضع حذف الجسيم لدى دراسة المسألة . فلماذا لا نتصور بان الموجة نفسها هى عبارة عن جسيم ؟ وبعبارة اخرى ان الجسيم هو تشكيل متلاحم من موجاته ، او كما يسميه الفيزيائيون — « حزمة من الموجات » . ويجب ان تتألف هذه الحزمة من عدد صغير من الموجات القصيرة جدا . لذلك فعندما تلتقى حزمتان او اكثر ، فانها ستسلك كما لو كانت جسيمات . وهى تشبه الفوتون ذا الموجات القصيرة عندما يطرد الالكترون من المعدن ! وعندها فلا بد ان تكون الحزمة مؤلفة من موجات مهما كانت متلاحمة ، ومهما كانت صفاتها مشابهة لصفات الجسيم . وهذا يعنى بانه توجد ظواهر تتجلى فيها طبيعتها الموجية الاولية..

لكن الطبيعة لا تقبل بهذه الفرضية ايضا . وقد تبين بانه لا يجوز من حيث المبدأ تكوين جسيم من مجموعات الحزم الموجية مهما كانت درجة تلاحمها . فان هذه الحزم تتفتت بمرور الزمن حتى لو وجدت فى الفراغ التام ! وخلال فترة قصيرة جدا من الزمن تنتشر هذه الحزم فى الفراغ بشكل الى حد ان الجسيم المتلاحم يمر قبل كل شيء فى مرحلة الانقسام المتجانس (homeopathic) . لكننا نعرف بان الجسيمات ثابتة تماما ، وانه ليس هناك من اثر لاى نوع من انقسامها وانتشارها مع الزمن .

وهكذا ظهر بانه ينبغي ترك هذا النموذج « الواضح » ايضا . وفشلت عملية الاتحاد الميكانيكى بين الموجة والجسيم ذوى الطبيعتين المتناقضتين فى صورة واحدة . وقد اتضحت فيما بعد استحالة الجمع بينهما . لكن دى برويل لم يرد التخلى عن مخلوقه الاسطورى الذى يؤلف الجسيم رأسه والموجة جسده .

ومضت سنتان . وفى صيف عام ١٩٢٧ جاء الفيزيائيون من مختلف ارجاء العالم الى بروكسل للاشتراك فى مؤتمر سولفى (Solvay Congress) . وفى هذا المؤتمر جرى دحض فرضية دى برويل حول العلاقة بين الموجات والجسيمات بشكل تام . وسادت لسنوات طويلة فرضية مختلفة تماما حول هذه العلاقة ، وقد طرحها فى المؤتمر الفيزيائيان الالمانيان فيرنر هيزنبرج (Werner Heisenberg) واروين شرودنجر (Erwin Schrödinger) .

سوية ام على انفراد ؟

قام هيزنبرج وشرودنجر بتوديع فرضية دى برويل الى مثواها الاخير ، لكنهما القيا عليها مرثية كان لها وقع عميق فى النفوس الى درجة انها حددت التطور اللاحق لميكانيكا الكم .

ان فكرة دى برويل الاساسية حول الموجات التى تصاحبها حركة الاجسام وجدت قبولا كبيرا لدى العلماء الشباب فى بعض البلدان . ولم يمر عام على ظهور مقالة دى برويل حتى طرح العالم الفيزيائى الالمانى ماكس بورن (Max Born) وجهة نظره بشأن موجات دى برويل .

كما اثارت هذه المسألة اهتمام تلميذ بورن وهو هيزنبرج الذى كان قد بدأ مسيرته فى طريق العلم منذ فترة وجيزة . كما نوقشت مقالة دى برويل بحماس فى حلقة صغيرة من الفيزيائيين شارك فيها شرودنجر .

وبعد ذلك ... وليعذرنا القارئ اذا ما التزمنا بالتتابع التاريخى للاحداث . فقد يكون للمشاهد الختامية للفيلم عندما تعرض فى بدايته تأثير دراماتيكى كبير ، وتساعد على تفسير ما يجرى فيه .

لنتذكر التجربة التى اثبتت بواسطتها ظاهرة حيود الالكترونات . وقد حدث فيها ان حزمة الالكترونات قد سقطت على البلورات (او على رقيقة خفيفة جدا من المعدن) . وبعد ان عانت الكترونات الحزمة

من الحيود على ذرات البلور ، فانها سقطت على اللوح الفوتوغرافى واضاءته . فظهرت حلقات الحيود على اللوح .

ويمكن ان نضيف الى ذلك بان حزمة الالكترونات المتولدة من فتيلة متوهجة من المعدن قد تكونت خصيصا . ثم وضع حاجز فيه فتحة دائرية صغيرة بين مصدر الحزمة والبلورات . وبعد مرور حزمة الالكترون عبر الفتحة اكتسبت اشكالا مستعرضة محددة .

فماذا يحدث لو توقف هذه التجربة فى بدايتها وعندما لا يزيد عدد الالكترونات المارة عبر الحاجز عن بضع عشرات ، مثلا ؟ لكنا شاهدنا لدى تحميض اللوح الفوتوغرافى بانه يشبه هدفا اطلق عليه الرصاص رام عديم الخبرة . وتبدو البقع المعتمة التى تمثل سقوط الكترونات منفردة على اللوح متناثرة فيه بشكل اعتباطى تماما .

واذا ما واصلنا التجربة لفترة أطول للاحظنا بان اماكن سقوط الالكترونات تأخذ شكلا منتظما . وبعد سقوط عدة آلاف من الالكترونات تظهر على اللوح الفوتوغرافى حلقات واضحة معتمة او فاتحة اللون ، والتى كشفت من قبل الباحثين .

وهذه حقيقة تلفت الانتباه . ومن الجلى انه ما دام عدد الالكترونات المشتركة فى التجربة قليلا ، فلا تلاحظ الصفات الموجية، بينما لا تبرز هذه الصفات الا عندما يكون عدد الالكترونات كبيرا . وبعبارة اخرى ان الصفات الموجية للالكترونات لا تظهر الا عندما تكون بمجموعات كبيرة .

فهل الامر كذلك ؟ للحصول على الجواب نعود الى التجربة من جديد . فنعيد تجربة حيود الالكترونات ، ولكن بشكل آخر . فيمكن أخذ مصدر قوى للالكترونات ، ونعرضه للوح فوتوغرافى فترة قصيرة من الزمن . وتتولد صورة الحيود على اللوح عندئذ بسرعة .

كما يمكن أخذ مصدر ضعيف للالكترونات ، ونطيل من فترة تعريضه للوح الفوتوغرافى . فاذا ما سقط على اللوح نفس العدد من الالكترونات فى الحالتين ، فسنحصل على صورتى حيود متشابهتين تماما .

وهذا أمر فى غاية الاهمية . ففى الحالة الاولى عندما تعانى الالكترونات ظاهرة الحيود على البلورة بصورة مفاجئة يجوز الحديث عن وجود مجموعات كبيرة من الالكترونات . اما فى الحالة الثانية عندما تسقط الالكترونات على اللوح بصورة منفردة تقريبا ، فان مفهوم المجموعات الكبيرة من الالكترونات يبدو غير مقنع .

فلا يمكننا تسمية بضعة افراد بانهم فريق من العمال ، اذا ما قام احدهم باللحام اليوم ، وادار الآخر مسمارا ملولبا بعد اسبوع ، بينما ثبته عامل ثالث بعد مرور شهر .

وهذا هو نفس الحال عندما تعانى آلاف الالكترونات من الحيود مرة واحدة او بفترات متقطعة كل على انفراد . وهذا يعنى باننا نستطيع ان نستنتج من ذلك امرا واحدا فقط . وهو ان كل الكترون يظهر خصائصه المميزة غير الاعتيادية بمعزل عن الالكترونات الاخرى ، كما لو لم تكن موجودة ابدا .

لنذهب الى ميدان الرماية

لنرجع الى الحديث عن « الهدف التالف » . فقد يكون نتيجة سقوط عدد صغير من الالكترونات على اللوح الفوتوغرافي . ويبدو لنا اول الامر بان الالكترونات تساقطت على اللوح كيفما اتفق .

لكن هناك شيء واحد يجذب الانتباه . ولنقس الفتحة في الحاجز التي مرت خلالها الالكترونات ، ثم ننقلها بشكلها العام الى الهدف . قد يبدو لنا بان جميع الالكترونات ، مهما كان سقوطها على اللوح عرضيا ، يجب ان « تنحصر » داخل هذا المحيط . اما واقع الامر فان عددا كبيرا من هذه الالكترونات المتساقطة تقع خارج حدود ذلك الشكل .

وهناك شيء هام آخر . فاذا ما درسنا الهدف بدقة فسنلاحظ بان الالكترونات لا تصطدم باللوح كيفما اتفق ابدا . وحتى عندما يكون عدد « الضربات » على الهدف قليلا ، فهناك مناطق ليست فيها اية ضربات كليا ، كما توجد مناطق تتجمع فيها الضربات بشكل مجموعات متراصة نوعا ما . واذا مددنا خطوطا بين هذه المناطق فسنحصل على دوائر صغيرة .

صحيح انها غير محددة بصورة جيدة ، لكنها تتخذ شكل حلقات حقيقية واضحة عندما يزداد عدد الالكترونات الساقطة بمرات كثيرة .

ودعنا نقوم بحيلة صغيرة . لنأخذ لوحة هدف حقيقية ثم نرسم

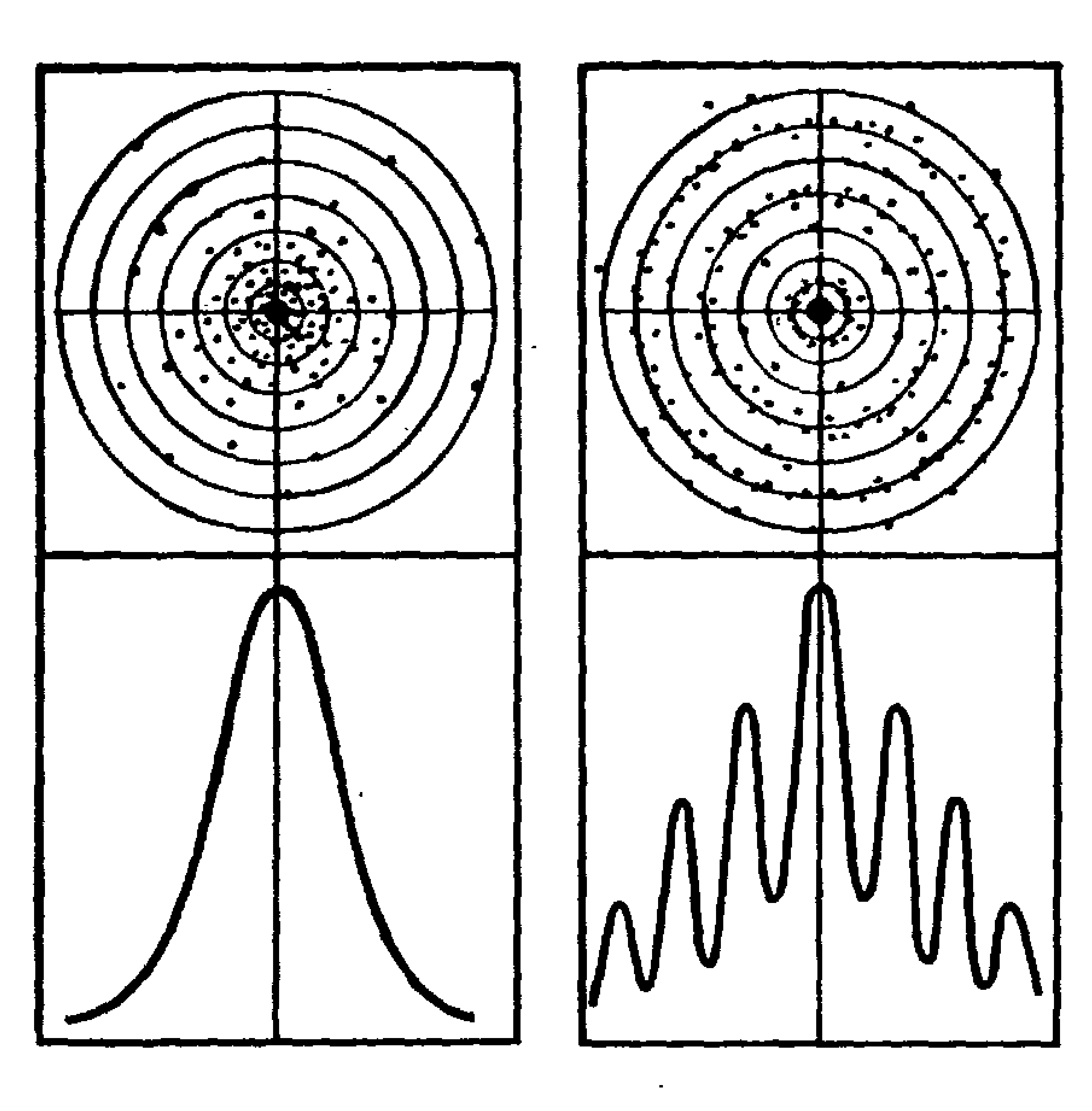
عليها نقاط سقوط الالكترونات على اللوح الفوتوغرافى . ثم نذهب الى ميدان الرماية حيث يتدرب الرماة المجربون ، ونريهم لوحة الهدف . ان رد فعلهم لدى رؤيتها سيكون غير اعتيادى بلا شك .

وعندما يزول الارتباك الذى يصيبهم لاول وهلة ، سينخرطون فى الضحك ويقولون : « ياله من رام يحب اللهو ! فهو هدّاف دقيق .. انظروا كم رصاصة وجه نحو رقم ١٠ . ولكن لماذا لا تلاحظ اية رصاصة فى رقم ٩ او رقم ٨ ؟ يبدو ان هذا الرامى يفضل توجيه رصاصاته نحو رقم ١٠ و٧ و٤ و١ . فهل فعل ذلك عن قصد ؟ » .

ولا نكشف لهم السر فورا . فيأتى المدرب ليلقى نظرة على هدفنا ... وتتغضن جبهته وهو غارق فى التفكير . ثم نستمع الى رأيه : « اى هراء ! لا يمكن لاى رام ان يطلق الرصاص على الهدف بهذا الشكل مهما حاول ذلك . وتسألنى عن السبب ، اليك السبب .

اذا كان الرامى عديم الخبرة فان ضربات الرصاص تتوزع على الهدف كيفما اتفق ، ولكن بشكل متناسق نوعا ما فى كافة ارجاء الهدف . اما هدف الرامى الخبير فانه يبدو بشكل مختلف تماما . فانظر .. ان ضربات الرصاص تتركز فى مركز الهدف ، بينما عددها فى الحلقات الخارجية قليل جدا . ودعنا نحسب عدد الضربات فى كل حلقة من حلقات الهدف ، ونعمل منها رسما بيانيا .

فنضع على احد محوريه عدد الحلقات (او المسافة التى تبعد بها عن مركز الهدف) ، بينما نضع على المحور الآخر عدد



شكل ٣

الضربات بين حلقتين . وانظر ماذا حصل لدينا . انظر كيف ينساب المنحنى الى اسفل عندما نبتعد الى حواف الهدف .

اما الآن فلنعمل رسما بيانيا من الهدف الذى جئتم به ... فانظر . ان المنحنى فيه يبدو متعرجا من الاعلى الى الاسفل بدلا من ان ينساب من المركز الى الحواف . وهو يتجه الى اسفل فى الواقع لكن ليس بنفس طريقة المنحنى الاول .

فلدينا ، نحن الرماة ، تعمل عملها قوانين الصدفة . والمنحنى الذى ذكرته لكم يسمى بمنحنى توزيع الاخطاء الاعتباطية (التى

تحدث صدفة) او بمنحنى جاوس . ويبدو ان عامل الصدفة يلعب دوره لديكم ايضا . لكنه يخضع لقانون آخر تماما . ولم يصادف وجود هذا القانون فى ميدان الرماية ابدا . فهذا شيء جديد ! »

فنقدم شكرنا للمدرب ، ولنعد الى هدفنا .

موجات الاحتمال

كان المدرب على حق فيما قال ، فلا وجود للمنحنى الموجى الشكل فى ميدان الرماية مطلقا ، ولا يمكن وجوده عموما . فالالكترونات ليست رصاصات . وكتلة الرصاصة كبيرة جدا ، بحيث يتعذر اكتشاف صفاتها الموجية .

وقد افترض بوهر بان المنحنى الناجم عن انتشار آثار الالكترونات فوق لوح فوتوغرافى بعد انعكاسها من على سطوح البلورات يمكن ان تعتبر موجات دى برويل .

ولكن مهلا ، فما العلاقة بين الموجة المرسومة على الورق والموجة الحقيقية التى ينبغى ان توجد فى الواقع ؟ فهذه الموجة تتحرك مع الالكترون بينما « تستقر » موجتنا ساكنة على الورق !

ومع ذلك توجد هناك علاقة ما . فالرسم البيانى لسقوط الالكترونات على اللوح الفوتوغرافى ليس من وليد الخيال . فهو يعكس بشكل من الاشكال وجود الموجة الواقعية التى ترتبط بالالكترون المتحرك . لكن مغزى هذه الموجة يختلف تماما عما أكسبه اياه دى برويل .

فكيف تتصور حركة الالكترون قوانين فيزياء نيوتن الكلاسيكية ؟
انها تقول بصراحة : ان الالكترون السائر من فتحة الحاجز يجب ان يتحرك بخط مستقيم حتى سقوطه على البلور . ثم ينعكس الالكترون عن ذرة البلور بشكل يشبه ضربة الكرة بشكل مائل على طاولة البليارد . وفي النهاية يسقط الالكترون ، المنعكس عن البلور بشكل مستقيم ، على اللوح الفوتوغرافي ويترك آثاره عليه .

ولا يوجد هنا انسان قد ترتجف يداه او يصيب عيناه التعب . كما لا توجد رياح ولا مجارى الهواء الحار المنبعثة من الارض والتي قد تؤثر على دقة التهديف . فظروف الرماية هنا مثالية ، ونتيجة لذلك لابد ان تكون دقة الرماية مثالية ايضا ... اى ان جميع الاصابات لابد وان تكون فى « رقم ١٠ » . وبتعبير آخر على الالكترونات ان تولد على اللوح الفوتوغرافي شكلا دقيقا للفتحة الموجودة فى الحاجز . واذا ما كانت هذه الفتحة مجرد ثقب صغير ، فان الصورة المتولدة يجب ان تكون بشكل نقطة صغيرة ... لا غير .

لكن الالكترونات لا تريد الخضوع للقوانين الكلاسيكية . وبدلا من نقطة صغيرة نحصل على مجموعة من الحلقات المعتمة والفاتحة اللون . ولا يعتمد الامر هنا على عدم الدقة فى الرماية . وحتى لو سمح بذلك لدقيقة واحدة ، وهو أمر محتمل ، لانتشرت عندئذ الالكترونات فى جميع جوانب اللوح الفوتوغرافي بموجب قانون جاوس . لكنها تتناثر فى الواقع بموجب قانون آخر تماما .. هو القانون «الموجى».

وان التشابه بين الرسم البيانى لتوزيع الالكترونات على اللوح الفوتوغرافى ليس مجرد تشابه سطحى مع الموجة . اذ ان الحيود الشديد للضوء واشعة رونتجن لها نفس الرسم البيانى . وهى موجات حقيقية كما نعلم !

وبذلك فان الصفات الموجية للالكترونات تظهر بشكل اكثر دقة مما كان يتصوره دى برويل . فالموجة الالكترونية ليست طائرة يحلق فيها الالكترون . وفى هذه الحالة تحدد هذه الموجة احتمال سقوط الالكترون فى منطقة ما من اللوح الفوتوغرافى . لذا فيمكن تسميتها بـ « موجة الاحتمال » كما اقترح ذلك ماكس بورن .

كيف دخل الاحتمال علم الفيزياء ؟

لا نجد فى الفيزياء الكلاسيكية اى ذكر لكلمة « الاحتمال » . فان حركة كل جسيم او جسم بشكل مضبوط ودقيق تحددها مسبقا القوى المؤثرة عليه . وان وضع الجسم وسرعته فى اية لحظة زمنية — وبعد ثانية وملايين السنين — ممكنة التحديد بثقة تامة ، اذا ما عرفت هذه القوى ووضع الجسم فى اللحظة التى نبدأ منها حساب الزمن .

وفى اواسط القرن التاسع عشر بدأ علم الفيزياء بدراسة الحركة الداخلية فى الغازات . فتبين على الفور بانه لا يجوز مطلقا استخدام معادلات نيوتن بصورة مباشرة فى دراسة حركة جزيئات الغازات .

فاحكم بنفسك ايها القارئ . ففى الحجوم الصغيرة للغازات توجد كمية ضخمة من الجزيئات تعادل مليارات المليارات . ويتطلب حلّ مسألة حركتها ، كتابة معادلات الحركة لكل من هذه الجزيئات . فالجزيئات لا تقف ساكنة فى محلها : فانها تتنقل فى فراغ الاناء ، وتصطدم ببعضها البعض ، وتهرب من بعضها لتنقض على الجزيئات الاخرى ، وهكذا تتكرر ملايين العمليات فى الثانية .

وهل يعنى ذلك انه تنبغى كتابة عدد من قوانين نيوتن يساوى عدد جزيئات الغاز ، ثم حلّ هذه المعادلات جميعا ؟ ان مجرد الحديث عن هذه المسألة يثير الضحك ! اذ تتطلب كتابة هذه المعادلات بالذات مليارات السنين ! وبعد مليارات اخرى من السنين نحصل على الحلول . وماذا تفيد هذه الحلول اذا ما كانت الحركة التى ندرسها قد تغيرت باخرى منذ زمن بعيد ؟

وقد اوجد الفيزيائيون فى بحثهم عن حلّ صائب لهذه المسألة الفكرة التالية : يجب عدم الاهتمام بحركة الجزيئات المنفردة من الغاز ، التى تتغير نتيجة اصطدامها بالجزيئات الاخرى بسرعة خارقة . بل يجب الاهتمام بوضع كل كتلة الغاز : درجة حرارته ، كثافته ، ضغطه والخصائص الاخرى .

ولا ضرورة لتحديد سرعات كل جزىء . فلابد ان تكون جميع خصائص وضع الغاز متعلقة بكل مجموعة الجزيئات ككل . وتحدد بشكل رئيسى بمتوسط سرعة الجزيئات فى الغاز . فكلما ازدادت هذه

السرعة ازدادت درجة الحرارة . واذا لم يغير الغاز عندئذ حجمه ، فان ضغطه يزداد بازدياد درجة الحرارة .

ولمعرفة هذه العلاقات بدقة يجب ان نتعلم كيفية حساب متوسط سرعة الجزيئات . وهنا جاءت نظرية الاحتمالات لتقدم يد المساعدة للفيزيائيين .

وتنص هذه النظرية على ما يلى : « من العبث التفكير بان جميع جزيئات الغاز ذات سرعة واحدة فى كل لحظة . بل الامر بالعكس ، فان سرعاتها مختلفة ، وهى تتغير بسرعة وبصورة غير منتظمة عند اصطدام الجزيئات ببعضها البعض . الا انه بالرغم من وجود عامل الصدفة فى التغييرات فى السرعة فانه توجد لها سرعة متوسطة ما ثابتة فى الظروف المعطاة . وما يبدو بالنسبة لنا صدفة بالنسبة لجزىء ما ، يصبح امرا حتميا عند ازدياد عددها . ويؤكد هذا الرأى قانون الاحتمال للاعداد الكبيرة . وعدد الجزيئات فى حجوم الغاز الموجودة لدينا كبير جدا فى الواقع ، لذا فيمكن تطبيق هذا القانون عليها دون شك » .

وهكذا أخذ الفيزيائيون يحسبون سلوك « المجموعات » الكبيرة من الجزيئات بحسب قانون الاحتمالات . لكن علماء الفيزياء لم يرغبوا فى الاتفاق مع نظرية الاحتمالات فى جانب آخر . فقد قالوا : ليس هناك مجال للحديث حول وجود اية صدفة فى حركة الجزيئات ! فكل اصطدام لجزىء بآخر ، وكل حركة للجزىء تحددها قوانين

نيوتن ، واذا ما اردنا حلّ مليارات المعادلات ، لاستطعنا التعبير عن هذه الحركات بدقة متناهية ، ودون اية مقادير متوسطة ! ونحن لا نفعل ذلك بالطبع . على اننا نستطيع ذلك من حيث المبدأ ! فنصف حركة الغاز باستخدام الاحتمالات والقوانين الاحصائية ، لكن مع ذلك تبقى فى اساسها قوانين ثابتة هى قوانين نيوتن !

وبذلك اختتمت « الثقة بالنفس » التى اتصفت بها الفيزياء الكلاسيكية . فلم يكن هناك اى اساس لتعميم قوانين نيوتن على حركة الجزيئات المنفردة . وهذا ما بينه التطور اللاحق لعلم الفيزياء . فالجزيئات ليست كرات بليارد ، انها تتحرك وتصطدم ببعضها البعض بموجب قوانين اخرى تماما .

تنبؤات حذرة

وكانت هذه قوانين جديدة .. قوانين تخضع لها الجسيمات المتناهية فى الصغر من الكترونات وذرات وجزيئات .

وكان أول من اعلن « تمرده » .. الالكترونات . فقد رفضت ان تدخل فى اطار قوانين الفيزياء الكلاسيكية حول « آداب السلوك » . وصاح بعض العلماء الذين صدموا بسبب عصيان الالكترونات قائلين بان الالكترونات أخذت ، بدلا من السقوط فى المواقع المحددة لها من اللوح الفوتوغرافى ، تتحرك « ... كما يحلو لها ، وكما تمليه عليها ارادتها الحرة » .

ومن السهل معرفة مدى ضلال اولئك العلماء الذين كانت تنقصهم المعارف الفلسفية . فما دام الالكترون يمتلك « ارادة حرة » فى التصرف ، فهو فوضوى لا يخضع لاى قانون . واذا ما كان الامر كذلك فما حاجتنا للعلم الذى يبحث عن هذه القوانين ، اذا لم يكن لها وجود على الاطلاق ؟ فالخالق هو الذى أوجد بقدرته الالكترون (ومن ثم فهو خالق جميع الاشياء فى الكون) الذى له حرية التصرف كما يريد ، وهو لا يخضع لاية قوانين ، سوى قانون آلهى واحد فى وجوده . لكن العلم لا يبحث هذا القانون ، بل ينظر اليه من زاوية الايمان فحسب . ومن ذلك نرى بكل بساطة ان « الارادة الحرة » للالكترون تقود الى مستنقع المثالية الموحل !

واعلن العلماء الذين ينطلقون فى تفكيرهم من وجهة النظر المادية بان : هذه القوانين الجديدة تكون صحيحة فى المجالات التى استنفذت فيها قوانين الفيزياء الكلاسيكية قيمتها .

وقد تنبأ لينين فى زمانه بذلك بفكره العبقرى . فقبل عشرين عاما على الاحداث المذكورة حذر العلماء بانه مهما كانت غرابة الصفات المكتشفة التى تتصف بها الالكترونات ، فان هذا لا يعنى الا شيئا واحدا — وهو انهم اخذوا يدركون العالم المحيط بصورة اكثر عمقا وصوابا .

واذا كانت الالكترونات ترفض ان تتبع قوانين الفيزياء الكلاسيكية فانها تخضع لقوانين جديدة هى قوانين ميكانيكا الكم .

فما هى هذه القوانين ؟ انها قبل كل شيء قوانين احتمالية .

فما الذى تدل عليه الحلقات الفاتحة على اللوح الفوتوغرافى (السالب) عند القيام بتجربة حيود الالكترونات ؟ انها تدل على ان الالكترونات لا تسقط فى هذه الاماكن من اللوح . وهذا يعنى بانه لا وجود « للارادة الحرة » لدى الالكترونات باى حال ، بدليل وجود اماكن لا تتساقط فيها الالكترونات .

وتلاحظ على اللوح الفوتوغرافى حلقات معتمة ايضا ، حيث يكثر فيها سقوط الالكترونات . الا انه لا تتساقط هناك جميع الالكترونات . اذ توجد على اللوح مناطق « رمادية » بين المناطق الفاتحة والمعتمة ، ويتساقط فيها عدد « وسط » من الالكترونات . ويتضح الامر لنا بصورة جيدة اذا ما تطلعنا الى الرسم البيانى لتوزيع ضربات الرصاص الذى رسمه لنا المدرب الرياضى .

ولننتقل الآن الى الشيء الاهم .

فها قد تطاير الكترون من مصدره ، ثم مرّ عبر الحاجز ، ثم انعكس من البلورة على اللوح الفوتوغرافى . ففى اية منطقة من اللوحة يسقط هذا الالكترون بالذات ؟

وتشير لنا الفيزياء الكلاسيكية الى مكان معين ، بعد اجراء حسابات دقيقة لزوايا السقوط والانعكاس والمسافات والسرعات . وغالبا ما لا تكون نتيجة هذه الحسابات صحيحة ، اذ يسقط الالكترون فى غير المكان المحدد .

اما ميكانيكا الكّم فتقول : « لا اعرف على وجه الدقة مكان السقوط ، لكنه فى اغلب الاحتمالات يكون فى مواضع الحلقات المعتمة ، وفى اقل الاحتمالات يكون فى المناطق الرمادية والاقل احتمالا من ذلك فى مناطق الحلقات الفاتحة » .

وهو تنبؤ يتّسم بالحذر ! حتى يبدو غريبا على العلم ، الذى يتطلع لان يصبح علما « مضبوطا » ، ان يعطى مثل هذا الجواب . بل هو حتى لا يبدو فى احكامه كأحد العلوم .

والحق ان التنبؤات « المضبوطة بصورة مطلقة » التى تطرحها الفيزياء الكلاسيكية كانت تروق كثيرا فيزيائيى ذلك الزمان . ولكن اذا ما امعن المرء التفكير فيها لادرك مدى التبجح الذى يختفى وراء هذه التنبؤات ، تبجح ... وفظاظة !

وفى الواقع ماذا يمكن القول عن العلم ، الذى بدأ قبل قليل فى دراسة واستقصاء العالم المعقد الى مالانهاية ، والذى بالكاد يعرف اى شيء عن الظواهر الحادثة فيه . ولكنه فى الوقت نفسه يقدم مثل هذه البيانات المطلقة .

لكن ربما كان موقفنا صارما جدا من الفيزياء الكلاسيكية . ولا بد لنا من الاعتراف بفائدتها فى عالم الاشياء اليومية الكبيرة . ومن اين لها ان تعرف بكونها متبجحة قبل ان تكتشف الكمات والصفات الموجية للجسيمات وغيرها من الاشياء الغريبة الكثيرة ؟

وبالطبع ان كل علم يسعى الى الادراك الدقيق والشامل للشيء الذى يتناوله بالبحث . فهذا هو الهدف الاساسى والدافع المحرك له . لكن من المستحيل ان يأتي يوم يقول فيه العلماء : « لقد عرفنا الآن كل شيء ! » ، وان العلم قد حقق جميع أهدافه وليس لديه ما يعمله .

هذا ما تعنيه جميع تلك التنبؤات الحذرة فى العلم وجميع تلك « الممكنات » و « الاحتمالات » . والآن زالت فى الفيزياء ايضا تلك « الغطرسة » التى لازمتها فى الفترة الكلاسيكية ، وعندما نتحدث عن الاحتمال فمعناه ان معلوماتنا عن الظواهر ليست شاملة ودقيقة بصورة مطلقة .

ويمكننا ان نتصور السخرية التى سيقابل بها الباحث فى محطة الارصاد الجوى اذا ما قال : « سيكون الطقس يوم غد حارا طيلة اليوم ، وبدون زخات مطر . وستكون درجة الحرارة فى الساعة التاسعة صباحا ٢٣ر٨ درجة مئوية ، وفى الساعة الثانية عشرة ظهرا ٢٩ر٦ درجة مئوية ، وفى الساعة الرابعة مساء ٢٧ر٤ درجة مئوية . وفى الساعة الواحدة بعد الظهر ستظهر فى سماء مناطق معينة مجموعات من السحب تغطى فى وقت معين مساحة معينة . وفى الساعة الخامسة مساء ستتجه السحب نحو الاتجاه الشمالى الشرقى بسرعة ١٢ر٣ كيلومتر فى الساعة » .

وسبب السخرية من هذا البيان مفهوم . اذ تشارك فى تكوين السحب عوامل كثيرة . ولا يستطيع علم الارصاد الجوى الحديث

أخذها جميعا بنظر الاعتبار بدقة واستيعاب شامل من اجل التوصل الى صحة التنبؤ بالطقس بصورة مطلقة . لذا فهو يخطئ في احيان كثيرة جدا ، مع الاسف ، حتى فى التنبؤات غير التفصيلية الى حد بعيد !

فما بالك بميكانيكا الكّم التى تدرس عالم الاشياء المتناهية فى الصغر الصعبة البلوغ .

موجات الجسيمات وجسيمات الموجات

وهكذا فقد شرحنا بان موجات دى بروبل تحدد حركة الالكترونات . لكنها لا تحددها بدقة بل بصورة محتملة . وفى تجربة حيود الالكترونات تشير هذه الموجات الى مناطق اللوح الفوتوغرافى التى يحتمل سقوط الالكترونات فيها اكثر من غيرها .

ولكن ألم يخطئ ماكس بورن فى اعتباره « لموجات الاحتمال » موجات دى بروبل ؟ وربما تكون موجات دى بروبل شيئا مختلفا تماما ؟ فاذا كان الامر كذلك فيمكن التحقق منه بسهولة .

لنرجع الى علاقة دى بروبل مرة اخرى . فيمكننا ان نستنتج منها انه عند ازدياد سرعة الالكترون يجب ان ينقص طول موجته . ويعرف الفيزيائيون بانه كلما ازدادت صلابة اشعة رونتجن وقصر طول موجتها ، كلما كانت صورة الحيود المتولدة اكثر انضغاطا . وقد جرت دراسة حيود الالكترونات ذات السرعات المتباينة . فوجد

ان شدّ حلقات الحيود لدى ازدياد سرعة الالكترونات يبدو بشكل واضح تماما .

واخيرا تمكن الفيزيائيون من الانتقال من طول الموجة الى المسافة بين الحلقات في الصورة (نمط الحيود) ، او بالعكس . فبينت الحسابات بانه اذا حسب طول الموجة الالكترونية من المسافة بين الحلقات ، لتمّ الحصول على مقادير تعادل بالضبط المقادير التى حصل عليها من علاقة دى برويل .

ولم يتبق عندئذ مجال للشك . وتبين بان « موجات الاحتمال » هى نفسها « موجات المادة » ، التى تنبأ دى برويل بوجودها .

وهى تظهر لا عند حيود الالكترونات فى البلورات فقط . وقد تبين بان موجات دى برويل ذات صفات شاملة ، فهى تساعد على حركة الالكترونات وغيرها من الجسيمات فى كل خطوة تقريبا .

ولا يمكن العثور على هذه الموجات دائما . اذ انه بازدياد كتلة وسرعة الجسيمات ينقص طول موجة دى برويل بسرعة ويتجاوز الحدود التى يمكن للاجهزة ان تقيسها فيها . وعندئذ تتبقى الصفات الجسيمية للجسيمات فقط .

ولنعد الى الحديث عن صفات الموجات . فالموجات الكهرومغناطيسية ، مثلا ، اذا لم تظهر قبل حد معين اية صفات جسيمية وتسلك سلوك الموجات ، فانها تتداخل مع بعضها البعض ، ويصيبها الحيود عند الحواجز وغير ذلك . ولكن حالما يصبح طولها

قصيرا بدرجة كافية ، فانها تبدأ القيام باعمال تتميز بها الجسيمات فحسب ، مثل طرد الالكترون من المعدن .

وتظهر صفات الجسيمات بأجلى اشكالها ، بصورة خاصة ، فى اقصر الموجات الكهرومغناطيسية المعروفة لحد الآن ــ وهى موجات جاماً . وتقوم بسهولة كبيرة بطرد جسيمات المادة !

ان اكتشاف دى برويل قد وحّد علم الظواهر الفيزيائية فى وحدة واحدة ، بمدّه الجسر الذى يربط بين مثل هذين النقيضين اللذين ينفى احدهما الآخر فى جوهره ، وهما الجسيمات والموجات . ولكن اذا ما وجدت هذه الوحدة فلا يعنى ذلك ان التناقضات بينهما قد محيت كليا .

وقد توغلا فى اعماق الاشياء وحددا سيماء الوجه العجيب لعالم الاشياء الدقيقة . وسنتناول فى الصفحات القادمة من كتابنا وصف سيماء هذا الوجه . فنكشف للقارئ اسرار الكثير من الظواهر العجيبة ، التى اصبحت ممكنة فى عالم الاشياء الدقيقة ، وفسرتها « موجات الاحتمال » بشكل رائع .

فى الطريق الى قانون الموجات

تصف هذه الموجات حركة الالكترونات وغيرها من جسيمات عالم الاشياء الدقيقة . وماذا نعنيه بكلمة « تصف » ؟

يمكن وصف اى شيء ، واية ظاهرة كيفيا وكميا . ونقوم فى

حياتنا اليومية عادة بالوصف الكيفى بصورة اساسية . فيكفى ان نقول : « سينزل المطر اليوم » ، لكى يأخذ المرء المظلة معه . ولا يهمه عندئذ المدة التى سيستمر فيها هطول المطر ، وعلى اى ارتفاع ستمر السحب وغير ذلك من التفاصيل الاخرى الكثيرة .

ان العلم ، وبالاخص اذا كان من العلوم الدقيقة كالفيزياء ، لا يكتفى بالوصف الكيفى . بل يحتاج الى الارقام ، وعلى ان تكون دقيقة قدر الامكان .

ونحن نصف نمط الحيود للالكترونات حتى الآن بصورة كيفية باعتباره تعاقب الحلقات الفاتحة والمعتمة . لكن يمكن وصفها كميا ايضا بقياس درجة العتمة فى مختلف اجزاء اللوح الفوتوغرافى ، ثم نرسم منحنى يشبه الذى رسمه المدرب على لوحة الهدف .

وقد يظهر لنا الآن باننا يمكن ان نصيغ نظرية حول هذه الظاهرة ثم نطمئن بهذه النتيجة . لكن ماذا عن الظواهر الاخرى ؟ فاى علم هذا الذى يضع نظرية منفصلة لكل ظاهرة !

وقوة هذا العلم تكمن فى كونه يضع النظريات التى تشمل سلسلة موحدة من مئات الظواهر التى لا تشبه الواحدة الاخرى . فاقوى النظريات واصلبها هى تلك التى تكون فى آن واحد اكثر النظريات اتساعا وشمولا .

ويبدأ وضع النظريات الكبرى الجديدة فى الفيزياء ، فى غالب الاحيان ، من بحث معادلة واحدة هامة جدا وتدعى بقانون الحركة .

واحد هذه القوانين معروف جيدا ، وهو قانون نيوتن الثانى . وهو يربط بين العجلة (التسارع) التى يكتسبها الجسم بكمية واتجاه القوة المؤثرة عليه . لكننا لا نلاحظ القوى والعجلة بصورة مباشرة . وبالنسبة لنا تتلخص الحركة تحت تأثير القوى فى ازاحة الجسم الملحوظة فى الفراغ والزمن .

ويتيح لنا قانون نيوتن ايجاد هذه الحركة بالذات . فالعجلة هى تغير سرعة الحركة فى الزمن . اما السرعة نفسها فهى تغيير وضع الجسم فى الزمن . وهكذا فان قانون نيوتن يربط فى نهاية الامر تغير موضع الجسم (انتقاله) بالقوة . فبحل معادلة نيوتن يتم الحصول على حركة الجسم . ويتم التعبير عنه بشكل منحنى ما ، يكونه الجسم بمرور الزمن . ويسمى هذا المنحنى بمسير المقذوف (trajectory) .

ويوجد فى الفيزياء قانون عام وواسع ايضا يتناول لا حركة الاجسام بل انتشار الموجات . ويكتب رياضيا بشكل معادلة تسمى بالمعادلة الموجية ، او معادلة دالمبرت (d'Alembert) ، وهو اسم مكتشفها العالم الفرنسى الشهير فى القرن الثامن عشر .

ولم تستنبط معادلتا نيوتن ودالمبرت كلتيهما من اية قوانين اخرى اكثر عمومية . وهما مبتكرتان اذا اردت . لكنهما مبتكرتان ، ولم يبتدعهما العقل من لاشيء ! فلم يبتدع العالمان هذين القانونين كيفما اتفق ، بل هما نتيجة التعميم النظرى لكثير من التجارب والمشاهدات ، التى اجراها من سبق نيوتن ودالمبرت من علماء .

ان عبقرية العالم لا تتجلى فى كونه يبتدع شيئا من بنات خياله . كلا ، ان العبقرى هو الذى يستطيع ان يدرك — ويستنبط من الاحداث المعقدة المتشابكة تأثير قوة ما ، وقانونا هاما معينا ... وهو الذى يخرج هذا القانون الى حيز الوجود ، ويقوم بتنقيته من شوائب الكثير من الظواهر الطارئة ، والتفاصيل التى لا قيمة لها ، ويصقله ثم يقدمه جاهزا الى الناس ، مكتوبا اما بكلمات واما بشكل معادلات كما فى العلوم الدقيقة . والآن يبدو القانون الجديد كأحد الاحجار الكريمة الثمينة للمعرفة ، ويجلب السرور الى قلوب الناس بجمال خطوطه ولمعان اطرافه .

فمن اى قانون يجب البدء ببناء اساس ميكانيكا الكمّ ؟ من المفهوم ان القانون الجديد لميكانيكا الكم يجب ان لا يقل عمومية واتساعا عن قانونى نيوتن ودالمبرت من أجل ان يشغل المكانة التى يحتلاها فى الفيزياء الكلاسيكية . والاكثر من ذلك ان القانون الجديد المخصص للعالم ذى الوجهين للاشياء المتناهية فى الصغر يجب ان يعوض لوحده عن القانونين المذكورين اللذين سبقاه . وعليه ان يصف ويشرح لوحده حركة الجسيمات وانتشار الموجات !

ومهما يكن من أمر فان نيوتن كان فى موقف اكثر سهولة . فقد توفرت لديه حقائق تجريبية كثيرة . فماذا لدينا من تجارب ؟ لا شيء مطلقا . ويمرّ عام ١٩٢٥ وما زال يفصل الفيزيائيون عن التجربة الفاصلة حول حيود الالكترونات حوالى ثلاثة اعوام . وكانت

علاقة دى برويل معروفة لكن عندما يدور الحديث حول طول موجة الجسيمات فانها لا يمكن ان تورد شيئا حول قانون حركتها .

وكانت ثقة الفيزيائيين النظريين فى كونهم يسيرون فى الدرب الصحيح عظيمة الى درجة انهم بدأوا بتكوين النظرية الجديدة ، دون انتظار الاختبار التجريبى لنبوءة دى برويل .

فمن اين نبدأ ؟ هل من تغير شكل معادلة نيوتن من أجل ان تشمل الصفات الموجية للجسيمات ؟ كلا ، ان التاريخ كان يسير بشكل آخر تماما . فان الفيزيائيين الذين ساروا وراء خطوات دى برويل حاولوا تعيير شكل معادلة الموجات من اجل ان تعكس الصفات الجسيمية للموجات . وقد بدا ذلك اكثر بساطة .

وكان اول نجاح فى هذا المجال قد تحقق على يد العالمين شرودنجر وهيزنبرج . وقد سلكا دروبا مختلفة تماما من اجل حلّ هذه المسألة الاساسية . والادهى من ذلك ان كلا العالمين لم يكونا يعرفان اى شىء عن عمل بعضهما البعض . وبعد مرور فترة من الوقت فقط بعد نشر عمليهما تمكن شرودنجر من ان يثبت بان حلّى المسألة كليهما يقومان على فكرة فيزيائية واحدة بالرغم من الاختلاف الظاهرى بينهما .

واستحدث هيزنبرج شكل المصفوفة لميكانيكا الكمّ . وهو فى غاية التعقيد وخارج نطاق هذا الكتاب . وقد بدل شرودنجر المعادلة الموجية من اجل ان تأخذ بنظر الاعتبار « الذوق » الجسيمى لموجات

دى برويل . وسميت المعادلة الجديدة تكريما له باسم معادلة شرودنجر. وهى من اكثر معادلات ميكانيكا الكم انتشارا بين الفيزيائيين.
وهكذا اصبح قانون الموجات القانون الاساسى فى ميكانيكا الكم .

اجهزة القياس تقول كلمتها !

لنرجع مرة اخرى الى موجات دى برويل . فحسب تفسير بورن لها ، والذى اكتسب فى نهاية الامر شكل معادلة شرودنجر ، فان هذه الموجات بشكل خاص تظهر فى التوزيع المتميز لاماكن تساقط الالكترونات على اللوح الفوتوغرافى . ولكن لابد من أجل ان تبدو هذه الصورة اكثر وضوحا من تواجد عدد كبير من الالكترونات ، كما اتضح لنا من قبل .

ولكن ما اهمية موجة دى برويل بالنسبة للالكترون الواحد ؟ اننا نعرف الجواب على ذلك ايضا ، فهى تحرف الالكترون عن « طريق السير » الكلاسيكى . وبدون هذا الانحراف لا يمكن لصورة نمط الحيود ان تظهر ابدا .

واعتقد ان ذلك مفهوم للقارئ . لكن هذا التفسير يترك مع ذلك احساسا بعدم الاقتناع . فبعد الاحاديث الكثيرة حول غرابة عالم الاشياء المتناهية فى الصغر فان المرء يود لسبب ما ان يرى الصفات الموجية للجسيمات وقد تجلت بشكل اكثر وضوحا وبصورة غير مألوفة .

ولنر الآن ما يمكن ان يقدمه لنا عالم الاشياء الدقيقة . لنفرض اننا اردنا اجراء بعض القياسات فيه . ولا يهمنا ما يكون عليه شكل جهاز القياس بالتفصيل . فعليه ان يقوم بالمهمة التالية : ان يتابع الالكترونات ، ويقيس سرعتها ووضعها فى الفراغ فى كل لحظة من الزمان .

ان الالكترون جسيم صغير جدا. ونحتاج لمتابعته الى ميكروسكوب « ذى قوة خارقة » . ولنفرض اننا تمكنا من صنع مثل هذا الميكروسكوب .

ويبرز السؤال الاول وهو : كيف سيجرى القياس ؟ ولا بد لنا من أجل رؤية اى شيء من انارته . فلا تمكن رؤية شيء فى الظلام الدامس .

وكيف تتم الانارة ؟ ان ذلك يتوقف على حجم الشيء . فالشرط الاول للحصول على صورة واضحة للشيء هو ان يكون طول موجة الضوء المستخدم فى الانارة اقل من مقاييس حجم ذلك الشيء . ويعمل الميكروسكوب الضوئى الاعتيادى على الموجات الضوئية التى يتراوح طولها ما بين ٤ر٠ الى ٨ر٠ ميكرون ، لذلك فانه يعطى صورة واضحة ودقيقة للاشياء التى لا تنقص مقاييس حجمها عن ٢ — ٣ ميكرون .

وهكذا فان الاشياء التى يبلغ حجمها نصف ميكرون لا تشاهد فى مثل هذا الميكروسكوب بوضوح . وعندما تبلغ مقاييس حجمه

بنفس ترتيب مقدار طول موجة الانارة ، يتولد حيود قوى للضوء .
ويتولد محل الصورة الواضحة للشيء نمط حيود يتألف من مناطق معتمة وفاتحة تشبه الخطوط العامة للشيء .

واذا ما حاولنا مشاهدة شيء اصغر من ذلك فانه لا تتولد اية صورة مطلقا : لان الضوء يمر بالشيء وكأنه لا وجود له ابدا .

ان الالكترون ليس ذرة غبار ولا بكتيريا ، ومقاييس حجمه (سنتحدث عنها فيما بعد وسنرى بانه لا يمكن ذكرها الا افتراضا) تنقص بقليل بمليار مرة عن طول موجات الضوء . فبأى شيء تمكن انارته ؟ لحسن الحظ توجد اشعة جاما ذات الموجات القصيرة جدا .

ولنأخذ احد الالكترونات ثم نضيئه من أجل مشاهدته باشعة جاما ... فلا نرى شيئا ! لا شيء ابدا ... كما لو كان لدينا الكترون ثم اختفى . ولا تتولد حتى حلقات الحيود . ومهما حاولنا رؤية صورة الالكترون ، فاننا لن نتمكن من تحقيق ذلك ابدا .

فما المسألة ؟ نعم ، ان الالكترون فى الواقع ليس دقيقة غبار ، وكمّ ـ جاما ليس فوتونا ضوئيا . ومع ذلك فان الدقيقة ذات وزن محسوس ، ويحمل فوتون الضوء طاقة صغيرة ، وهذا يعنى وجود كمية تحرك (momentum) فيه .

فمن اين يأتى الفوتون بكمية التحرك ؟ سنشرح ذلك الآن . اننا نعرف بان الفوتون يستطيع ان يتصرف كما لو كان جسيما ـ وقد بيّن اينشتين ذلك فى نظريته حول ظاهرة التحول الضوئى . فاحكم

بنفسك : ان سرعة الفوتون فى الفراغ هى واحدة دائما — وهى سرعة الضوء ، اما طول موجته فقد يكون مختلفا . ولنطبق على الفوتون علاقة دى برويل :

$$\lambda = \frac{h}{\text{ك} \times \text{ع}}$$

ولنجعل السرعة ع فيها تساوى سرعة الضوء حـ . عندئذ يمكن ايجاد كتلة الفوتون (وهى بالطبع كتلة الفوتون المتحرك ، اما كتلة الفوتون الساكن فتساوى صفرا تماما) :

$$\text{ك} = \frac{h}{\lambda \times \text{حـ}}$$

اما كمية تحرك الفوتون فهى حاصل ضرب كتلته فى سرعته :

$$\text{م} = \text{ك} \times \text{حـ} = \frac{h}{\lambda}$$

فهل تعب القارئ من المعادلات الرياضية ؟ كلا ؟ اذن لنواصل الاستنتاج : فمن هذه المعادلة يظهر لنا بانه كلما ينقص طول موجة الفوتون تزداد كمية تحركه بسرعة .

وعندما يصطدم فوتون الضوء بدقيقة ما فانه يكسبها كمية تحركه ثم يبتعد عنها متجها نحو منظار الميكروسكوب — اى نحو العين . اما الدقيقة فانها لم تتأثر ابدا بهذه الصدمة . فتبقى فى مكانها ساكنة ،

وتستمر بذلك فى حالة السكون ، واذا ما كانت متحركة فانها تواصل حركتها دون ان تغير من حركتها نتيجة الصدمة ولو قيد انملة .

اما الالكترون فيختلف أمره كليا . فكتلته صغيرة جدا بالمقارنة مع الدقيقة ، وكمية تحركه ، كما سنرى فيما بعد ، هى ضئيلة جدا حتى لدى اكثر الالكترونات سرعة . وعندما نوّجه نحوه فوتون ــ جاما التى تزيد كمية تحركه بما يزيد عن مليار مرة عن فوتون الضوء . وعندما يصطدم فوتون ــ جاما هذا بالالكترون ، فلا تجد للاخير أثرا ! فقد كان هناك الكترون فى هذا المكان ثم طار الى مكان مجهول . فلا تفكر حقا فى الحصول على صورة او حلقات حيود له !

وهذا يعنى بان الامور ليست على ما يرام . فنحن نعرف بان الالكترون يطير ، ولكننا لا نعرف سرعته : فاذا ما وجهنا عليه ضوء فوتون ــ جاما فان الالكترون يغير سرعته . كما لنفرض باننا نعرف بان سرعة الالكترون تساوى صفرا ، حيث يقف ساكنا فى مكان ما . لكن من المستحيل ايجاد مكانه : فحالما توجه اليه اشعة ما يقفز من مكانه ويطير الى مكان مجهول .

ولكم كان العمل سهلا لدى استخدام الميكروسكوب القديم ! فاذا ما تحركت فى مجال الرؤية دقيقة او باكتيريا ، فيمكن القول دائما اين مكانها ، وما هى سرعتها . ولكن عندما نحاول ايجاد موقع الالكترون فتجب معرفة سرعته . الا اننا فى محاولتنا ذلك نضيع الجسيم نفسه نهائيا . فاية غرائب تجرى فى العالم !

علاقة الريبة

ان ما ذكرناه اعلاه يطابق الواقع تقريبا . ويمكننا التأكد من ذلك باجراء حساب بسيط باستخدام مثال الدقيقة والالكترون نفسها .

لنفرض بان حجم الدقيقة هو ميكرون واحد ($١٠^{-٤}$ سنتيمتر) ، وتتألف من مادة ذات كثافة ١٠ جرامات فى السنتيمتر المكعب (وهو يزيد قليلا على كثافة الحديد) . وكانت هذه الدقيقة تتحرك فى مجال رؤية الميكروسكوب بسرعة ضئيلة جدا ــ وهى ميكرون واحد فى الثانية . وعندئذ يكون وزنها $١٠^{-١١}$ جرام ، وكمية تحركها $١٠^{-١٥}$ جرام لكل سنتيمتر فى الثانية . فاذا ما وجه اليها ضوء ذو موجة طويلة ، ولنفرض انها نصف ميكرون (وهو اللون الاخضر فى الطيف الضوئى) فان كمية تحرك الفوتونات فيها تكون $١٠^{-٢٢}$ فقط ، اى بأقل من كمية تحرك الدقيقة بعشرات الملايين من المرات . ومن الطبيعى ان لا تولد ضربات الفوتونات اى تأثير على الدقيقة !

اما فى حالة الالكترون فان الوضع يختلف تماما . فحتى اذا ما تحرك الالكترون بسرعة الضوء وهى $١٠^{١٠}$ سنتيمتر فى الثانية فان كمية تحركه تساوى $١٠^{-١٧}$ جرام لكل سنتيمتر فى الثانية فقط . اما فوتون ــ جاما المستخدم فى انارته ، وهو ذو موجة قصيرة جدا تبلغ على سبيل المثال ٦×١٠^{-١٣} سنتيمتر ، فتبلغ كمية تحركه $١٠^{-١٤}$ ،

وهذا المقدار يزيد بعشرات آلاف المرات عما هو في الالكترون . وبالطبع فان الفوتون عندما يصطدم بالالكترون يزيحه فورا من طريقه . فهو يشبه قذيفة مدفع اطلقت على سرب من العصافير !

ومن الواضح الآن ان امكانيات اجهزة القياس المتوفرة حاليا ، للقياس في عالم الاشياء المتناهية في الصغر ، هي محدودة جدا ، فهي لا تستطيع قياس حركة الجسيمات باية درجة من الدقة .

فما هي مظاهر عدم الدقة ، وبتعبير أفضل (ستدرك السبب عند قراءة الصفحات التالية) الريبة وعدم اليقين في القياس ؟ ان الجواب على هذا السؤال تقدمه علاقة الريبة (the uncertainty relation) او عدم التحديد التي استنتجها هيزنبرج في عام ١٩٢٧ من القوانين العامة لميكانيكا الكم . وهي كما يلي :

$$\Delta \text{س} \times \Delta \text{ع}_{\text{س}} \geq \frac{h}{\text{ك}}$$

(في الحقيقة انه كان من الواجب ان يوضع بدلا من h المقدار h/2π، لكن هذا شيء لا اهمية له بالنسبة لحديثنا فان المقدارين لا يختلفان سوى بست مرات) . وفي هذه الصيغة تكون Δ س – هي الريبة في قياس موضع (احداثيات) الجسم س ، و Δع$_{\text{س}}$ – هي الريبة في قياس سرعته ع$_{\text{س}}$ باتجاه س ، وك تمثل كتلة الجسيم، اما العلامة ≥ فتبين بان حاصل ضرب مقادير الريبة هذه لا يجوز ان ينقص عن المقدار الموجود في الطرف الايسر من العلاقة .

وتكمن « الغرابة » التى تحدثنا عنها بالتفصيل اعلاه فيما يلى :
اذا حاولنا قياس وضع الجسيم بدقة مطلقة ، فان الريبة فى احداثيه
Δس يجب ، وهذا أمر مفهوم ، ان تساوى الصفر . ولكن عندئذ
تصبح الريبة فى سرعتها بموجب قوانين الرياضيات الصارمة ، كما
يلى :

$$\Delta ع_{س} = \frac{h/ك}{\Delta س} = \frac{h/ك}{0} = \infty$$

اى تؤول الى ما لانهاية . وبكلمة أخرى فان سرعة الجسيم فى اللحظة
التى يجرى فيها قياسها ، تصبح غير محددة تماما (مريبة) . وبالعكس
فاذا ما قيست سرعة الجسيم فى لحظة ما بدقة مطلقة ، فعندها لا
يمكن تحديد موضع الجسيم خلال تلك الفترة .

فما العمل فى هذه الحالة ؟ ربما نقبل بالحلّ الوسط ، فنرضى
بقياس وضع وسرعة الالكترون بشىء من عدم الدقة ، وسوف لا يكون
كبيرا على كل حال .

ولننظر مقادير عدم الدقة فى القياس فى حالة الدقيقة والالكترون .
يساوى المقدار الايسر فى علاقة هيزنبرج بالنسبة للدقيقة حوالى $١٠^{-١٥}$.
فنختار قيمة « وسطا » للريبة : $\Delta س = ١٠^{-٨}$ سنتيمتر ، $\Delta ع_{س} = ١٠^{-٧}$
سنتيمتر فى الثانية (وبضربهما نحصل فى الطرف الايسر
على المقدار $١٠^{-١٥}$) .

وان نسبة $\Delta ع_{س}$ الى $ع_{س}$ هى $١٠^{-٧} : ١٠^{-٤} = ١٠^{-٣}$ ، اى جزء واحد من الالف . ان مثل هذه الريبة فى قياس السرعة لا يمكن ان لا ترضينا : فليس كل سبيدومتر (مقياس السرعة) قادر على القياس بمثل هذه الدقة !

اما بخصوص الريبة فى وضع الدقيقة Δ س ، فانها تؤلف بالنسبة الى مقاييس حجم الدقيقة : $١٠^{-٨} : ١٠^{-٤} = ١٠^{-٤}$ ، اى جزء واحد من عشرة آلا ف . وهذه الريبة تطابق مقاييس ذرة واحدة فى الدقيقة !

لذلك فعند اجراء قياس سرعة ووضع الدقائق والجسيمات ، وكذلك الاشياء ذات الكتل الاكبر ، لا يمكننا حتى تصور وجود ريبة فى العلاقة .

لكن يختلف الوضع فى حالة الالكترون . « فمقاييسه الحجمية » (ونذكر القارئ من جديد بانها افتراضية ، بروح الفيزياء الكلاسيكية ، التى تصور الالكترون بشكل كرية مشحونة) هى حوالى $١٠^{-١٣}$ سنتيمتر ، وكتلته $١٠^{-٢٧}$ جرام ، وسرعة الالكترون غير السريع جدا ، والذى يتحرك بفرق فى الجهد فى المجال الكهربائى مقداره فولط واحد ، هى حوالى $١٠^{٧}$ سنتيمتر فى الثانية . ويساوى المقدار فى الطرف الايسر من علاقة الريبة حوالى ١٠ .

وهناك طرق مختلفة فى استخراج هذا المقدار من Δس و$\Delta ع_{س}$. فلنفرض ، مثلا ، اننا اردنا تحديد سرعة الالكترون بدقة

قياس سرعة الدقيقة ، اى $١٠^{-٣}$. فان الريبة تساوى عندئذ :
$\Delta ع_{س} = ١٠^{٤}$ سنتيمتر فى الثانية ($١٠^{٤} : ١٠^{٧} = ١٠^{-٣}$)، و $\Delta س = ١٠^{-٣}$ سنتيمتر . ولا تزيد الريبة فى قياس وضع الالكترون كثيرا او قليلا بمليارات المرات عن مقاييس « حجمه » .

ولنحاول الدقة فى قياس السرعة فنصل الى نسبة ١٠٠ بالمئة ، مثلا ، اى الى مقدار السرعة نفسها . وسيؤدى ذلك ، كما يقول الفيزيائيون، الى اعطاء ترتيب المقدار المقاس. وعندئذ فان $\Delta ع_{س} = ١٠^{٧}$، و $\Delta س = ١٠^{-٦}$ سنتيمتر ، اى مع ذلك بمقدار ملايين المرات زيادة عن مقاييس حجم الالكترون .

فاى حل وسط هذا ؟ ان طبيعة عالم الاشياء المتناهية فى الصغر لا ترضى به !

لمن يوجه اللوم ــ الى جهاز القياس أم الى الالكترون ؟

لم تواجه الفيزياء الكلاسيكية طبعا مثل هذه الحالة ابدا . واعتبرت انه من الممكن ولو من حيث المبدأ ، قياس موضع وسرعة اى جسيم فى اية لحظة، بدقة مطلقة. وهذه الفكرة تكمن فى اساس تنبؤاتها « ذات الدقة المطلقة » حول حركة الجسيمات فى موضع تواجدها وسرعاتها فى لحظة ابتدائية ما من الزمن .

لكننا نجد الآن بانه لا يمكن الحديث حول اية دقة مطلقة

فى القياس ، حتى من حيث المبدأ . فما القضية ؟ ربما النقص يكمن فى جهاز القياس ؟

وفى الواقع لا يوجد اى جهاز للقياس يستطيع قياس مقدار ما بدقة مطلقة . ربما يمكن القول بان تاريخ تطور اجهزة القياس — هو تاريخ ازدياد دقة قياس هذه الاجهزة بصورة مستمرة . وقد بلغت دقة القياس فى كثير من مجالات العلم والتكنيك اليوم درجة رفيعة جدا . وهى تزداد رفعة اكثر فاكثر .

لكن ها هى علاقة الريبة تبدو وكانها تضع حدا لازدياد دقة الاجهزة . اذ انها تقول نصا : مهما كانت درجة كمال اجهزتكم ، فانكم لا تستطيعون تجاوز هذا الحد .

وقد أكد هيزنبرج بان الذنب يقع فى نشوء هذا الوضع على الاجهزة نفسها . وقد ايده فى ذلك عدد كبير من الفيزيائيين . فجهاز القياس فى عالم الاشياء الدقيقة لا يشبه التلسكوب المستخدم فى دراسة الكون . ولو ان كليهما ضروريان . فاعضاء الحسّ لدى الانسان التى يدرك العالم من خلالها ، ذات امكانيات محدودة . ومن ثم ، فلا بد من وجود جهاز يقوم بنقل الظواهر فى حدود عالمه الى « لغة » الاحاسيس البشرية .

ولكن اذا ما كان التلسكوب لا يؤثر مطلقا على حركة الاجرام التى تراقب بواسطته ، فان الوضع يختلف تماما فى عالم الاشياء الدقيقة . فيتدخل الجهاز (ومثاله الميكروسكوب الشديد الحساسية

ـــsupermicroscope ــ المثالى) وبصورة فعالة فى هذا العالم فى شؤون الظواهر المدروسة بواسطته ، ويغيّر خط سيرها « الطبيعى » . والاكثر من ذلك انه يغيره الى درجة نعجز فيها عن فصل الظاهرة بشكلها النقى . ان حدود «نقاوة» المراقبة بالجهاز هى بالذات ما تطرحه علاقة الريبة .

وقال بعض الفيزيائيين بان المسؤول عن الوضع الناشئ هو الالكترون . واوردوا لاثبات ذلك وجهة نظر مقنعة . فان عالم الاشياء المناهية فى الصغر يحيا بموجب قوانينه الخاصة ، وهو ليس بحاجة الى القياس للاستمرار فى وجوده . فما معنى القول بوجود صفات موجية لدى الالكترون ؟

فنحن لا نستطيع القول بان ذبذبة البندول فى لحظة معينة هى كذا وكذا ! فلتحديدها يجب علينا متابعة ذبذبات البندول خلال فترة زمنية محددة . وبالمثل لا يجوز القول بان طول الموجة فى نقطة معينة هى كذا وكذا . فان طول الموجة فى جوهرها هى منحنى خصائصى طويل (بالتحديد طويل الى ما لا نهاية) لسلسلة من الموجات . ومهما كانت طبيعة هذه الموجات فان طولها لا يتوقف على وضع نقطة ما فى الموجة .

ولنأخذ علاقة دى برويل ثم نكتبها بحيث يكون فى جانبها مقدار سرعة الجسيم :

$$ع = \frac{h}{ك \times \lambda}$$

ونستنتج من ذلك فورا بان طول الموجة λ لا يعتمد على وضع نقطة ما فى الموجة (مثلا النقطة التى يعتقد ان الجسيم يوجد فيها) ، كما لا يمكن لسرعتها ان تعتمد على وضع الجسيم .

وهكذا فان سبب عجز الاجهزة يعود بالذات الى الصفات الموجية للالكترون .

فمن منهما على صواب ؟ هل هو الفريق الذى يتّهم الجهاز بعدم القدرة للتكيف فى عالم الاشياء الدقيقة ، ام الفريق الذى يتّهم عالم الاشياء الدقيقة فى كونه غير سهل المنال بالنسبة للقياس ؟

وقد اتضح ان كليهما على حق ، ولكن مناصفة . فالحقيقة هى ان علاقة هيزنبرج تظهر « ذنب » كلا من جهاز القياس والالكترون فى ذلك . على ان الذنب لا يقع عليهما فقط ...

محاولة باستخدام وسائل « شبه عاطلة »

ماذا نطلب من الجهاز ؟ قبل كل شىء ان يعطينا المعلومات التى نريدها . وليس للجهاز ارادة ذاتية مستقلة ابدا ، فهو منفذ مطيع لارادة الانسان .

والجهاز الذى نريد استخدامه فى النظر الى عالم الاشياء الصغير له « وجهان » الى حدّ ما . ويوجد فيه طرفان — « الدخول » و « الخروج » . ففى الدخول يعالج الظواهر التى تخضع لقوانين الكّم ،

اما فى الخروج فهو يقدم معطيات مكتوبة « باللغة » الكلاسيكية ، فليس هناك من « لغة » أخرى تتفهمها اعضاء حسّ الانسان .

وقد طلبنا من الجهاز ان يعلمنا فى كل لحظة عن مكان وجود وسرعة الالكترون . ويعترف الجهاز بصراحة بانه غير قادر على القيام بهذه المهمة . فهى فوق طاقته . ولكنه يستطيع تقديم المعلومات حول السرعات بدون تبيان موضع الالكترون فى لحظة قياس السرعة ، او بالعكس يشير الى موضعه دون تبيان السرعات فى هذه اللحظة .

واذا ما امعنا التفكير فى المسألة فان الذنب فى ذلك يقع على الفيزيائيين فى الدرجة الاولى . فهم طلبوا من الجهاز ان يقدم المعلومات حول اعتماد سرعة الالكترون على موضعه ، بينما يظهر فجأة بانه لا تربط هذين المقدارين أية رابطة !

وفى ذلك تكمن احدى « عجائب » عالم الاشياء الدقيقة ، واحدى مظاهر الطبيعة الموجية للجسيمات . وينتج من ذلك ان المفاهيم الكلاسيكية القديمة والمقادير التى استخدمتها الفيزياء باطمئنان مئات السنين تعتبر غير صالحة للاستعمال لدى دخول عالم الاشياء المتناهية فى الصغر !

والتعبير الافضل لذلك هو « شبه عاطلة » . وهذه المفاهيم تبقى سارية المفعول فى عالم الاشياء الدقيقة ايضا ، لكن يتضح الآن عدم صلاحيتها التامة وامكانيتها المحدودة . وتشير علاقة الريبة الى الحدود التى يمكن ضمنها استخدام هذه المفاهيم .

وكان بالمستطاع اعتبار الالكترون جسيما يشبه بقطة ، والقول عن ثقة بانه يتخذ وضعا مضبوطا فى الفراغ ، لو لم تقترن به الموجة بصورة قوية . وتعمل الموجة على « نشر » موضع الالكترون : اذ يستطيع ان يشغل اى مكان فى موجته الخاصة .

وفى النتيجة يزداد طول الموجة بالنسبة للالكترون الساكن الى ما لانهاية ، وبالاضافة الى ذلك لا بد وان تفشل جميع محاولات ايجاده فى مكان محدد ما . ومن الناحية الاخرى ، فكلما ازدادت سرعة الالكترون ، كلما كان موضعه فى الموجة اكثر دقة . ولكن حتى فى سرعات الحركة العالية جدا فان « نشر » الالكترون يزيد بكثير على « مقاييس حجمه » الخاصة .

وقد تبين انه فى عالم الاشياء المتناهية فى الصغر لا تقتصر عدم الكفاية على المفاهيم الكلاسيكية حول وضع وسرعة الالكترون فقط . اذ تشاركها فى ذلك بعض الكميات مثل الزمن وطاقة الجسيم وكثير غيرهما .

ومن حق القارئ ان يتساءل لماذا اذن لم يتخل الفيزيائيون عن المفاهيم الكلاسيكية والكميات التى لا تقوم بوظيفتها فى عالم الاشياء الدقيقة بشكل طبيعى ، واحلالها باخرى جديدة ، تتفق مع الصفات غير العادية لهذا العالم ؟

ربما لا يتمكن القارئ من ادراك مدى تعقيد هذه القضية الشديد ! فانها تخص طبيعة الادراك البشرى نفسها . وسنتحدث عن

ذلك بالتفصيل فى نهاية الكتاب . اما الآن فسنكتفى بالقول بان تغيير المفاهيم والتصورات فى الفيزياء ، كما فى اى مجال آخر من مجالات العلوم — هو عملية طويلة جدا ، ومعقدة وشاقة . وقد مضت آلا ف السنوات قبل ان يغير الناس تصوراتهم الساذجة السابقة حول الكون ، وحول جوهر الحياة ، وحول الطبيعة غير الحيّة ، وحول تركيب الذرات . ولكم ستبدو مفاهيمنا ساذجة لاحفادنا البعيدين الذين سيعيشون بعد مرور مئات السنين بعدنا !

وتنمو المعارف البشرية فى ايامنا بسرعة خارقة . ومع ذلك فان عملية ادراك جوهر العوالم الجديدة ، والظواهر الجديدة لم تبق كما هى فحسب ، بل اصبحت اكثر صعوبة وتناقضا . وقد اعطاها اينشتين وصفا عميقا وصائبا عندما قال بانها : « مأساة الافكار » !

وهذا ما حدث بالضبط عندما نقلت الافكار والمفاهيم الكلاسيكية الى عالم الاشياء المتناهية فى الصغر .

« معجزة » اخرى

يحب الاطفال اقتحام البساتين المجاورة للحصول على ثمار التفاح . وكان الاجراء المضاد لذلك هو ان اصحاب البساتين بدأوا بانشاء الاسيجة العالية . والآن يقف الصبى الشاطر امام هذا «الحاجز الاصطناعى » ويحلم بكل كيانه فى دخول البستان . لكن السياج العالى الاملس يجعل كل احلامه مستحيلة التحقيق تقريبا .

فما العمل ؟ ربما يحصل على سلم فى مكان ما ؟ او يجد زملاء يشاركونه في مغامرته فيعتلى ظهورهم ويصعد الى أعلى السياج ؟ او يركض باقصى سرعته ثم يقفز الى السياج ، كما يفعل ديك فتى ؟ ان الانسان حريص على ما منع !

وقد يعجب صبينا بل حتى لينسى التفكير فى التفاح لو أتاه أحدهم وقال له : « مسكين ايها الصبى ! فلو كنت أخف وزنا ، لما ارهقت نفسك في التفكير ، ولانتقلت في لمح البصر الى الجانب الآخر من السياج » .

ان الصبيان فى ايامنا لا يؤمنون بالحكايات ، ويا للاسف الشديد ! فتوجد فى عالم الاشياء المتناهية فى الصغر احداث خرافية حقا . ومنها تغلغل الجسيمات عبر الحواجز « الصلدة » تماما .

ولندرس هذه الظاهرة باهتمام . فماذا يعنى فى الواقع عبور السياج او القفز فوقه ؟ نحن نعرف منذ ايام الدراسة فى المدرسة بان الجسم كلما كان واطئا ، كلما انخفضت طاقته الوضعية . فاذا وقفت على الارض فان طاقتك الوضعية تكون اقل مما لو جلست فوق السياج . كما ونعرف بأى مقدار تكون أقل : ونحصل عليه من حاصل ضرب وزن الجسم فى فرق ارتفاع نقطة مركز ثقل الجسم فى هذين الوضعين ، ويساوى الفرق فى الارتفاعين ارتفاع السياج ناقصا مترا واحدا تقريبا .

يمكن عبور السياج اذا ما حصلنا لبعض الوقت على الطاقة التى

تنقصنا . ويمكن القيام بذلك اما على حساب عمل عضلات الجسم ، واما سوية مع عمل عضلات الزملاء الاخرين الذين يقدمون ظهورهم لاعتلائها . وفي كلتا الحالتين يهدف هذا العمل الى مضاعفة طاقة الوضع لدى الانسان ، وعندها يستطيع الصعود الى اعلى السياج .

اما الباقي فهو أمر سهل . فلا يتطلب الهبوط من فوق السياج جهدا كبيرا . بل بالعكس ، فان الانسان يصرف بعض الجهد من أجل الا يكون نزوله الى الارض سريعا جدا بفعل قوة جاذبية الارض ، ولئلا تنتهي المغامرة بتمزيق سراويله . وتنقص طاقة الوضع في الجانب الآخر من السياج مرة اخرى وتصبح كما كانت قبل عبوره .

واذا ما حاولنا عمل رسم بياني يصور علاقة طاقة الوضع لدى الانسان عند عبور السياج لتكون لدينا « مرتفع » . ويسمى هذا المرتفع في الفيزياء بالحاجز الجهدي (potential barrier) .



شكل ٤

وفى عالم الذرة توجد « أسيجة » ايضا . فمثلا يوجد فى المعدن عدد كبير من الالكترونات الطليقة (الحرة) التى ترتبط بذراتها بروابط ضعيفة . ولكن بالرغم من كونها حرة وطليقة ومع ذلك فلم يحدث ان تطايرت الالكترونات من المعدن لوحدها . فالمسألة لا تتعلق بالحرية التامة للالكترونات . وبالرغم من ان الالكترونات غير مرتبطة بروابط متينة مع الذرات التى برزت منها ، فانها تنجذب مع ذلك الى الايونات المتكونة عند ذاك (سنشرح هذه الظاهرة بالتفصيل فى الباب القادم) . ويمكن تصوير التأثير المشترك لجميع الايونات على الالكترونات فى قطعة المعدن كما لو كانت « باحة » بيت تسرح فيها الالكترونات وقد احيطت « بسياج » عال يعزلها عن الفضاء الخارجى .

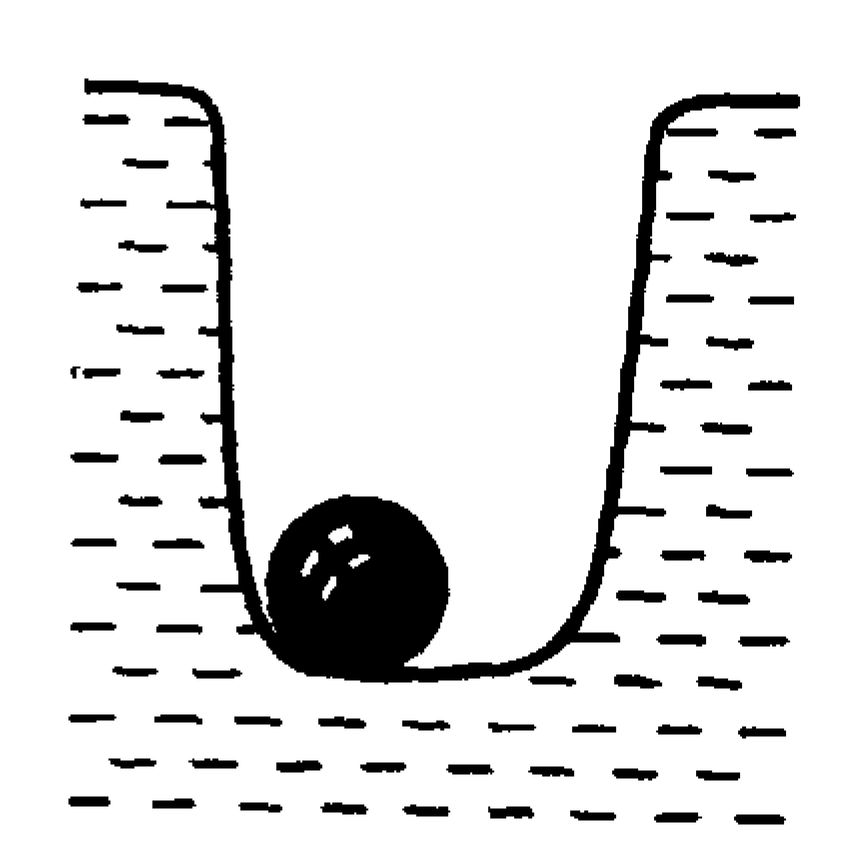
وتشبه الالكترونات فى قطعة المعدن الكرات فى الحفرة التى تحدثنا عنها لدى شرح نظرية بوهر. فتتحرك الالكترونات فى داخل المعدن كما يحلو لها ، لكنها لا تستطيع الخروج الى ما وراء حدوده ، وهو نفس حال الكرات فى الحفرة . ولهذا السبب فان الظروف التى تتواجد فيها الالكترونات فى المعدن تسمى بحفرة الجهد .

ومع هذا فان الالكترونات لا تبقى حبيسة فى قطعة المعدن الى الابد . ففى ظروف معينة تقفز عبر السياج وتصبح خارج نطاق المعدن . ويحدث ذلك ، مثلا ، عندما تسلط على المعدن الاشعة ذات الموجات القصيرة بدرجة كافية . ويمكن للفوتون النشيط ان يصطدم

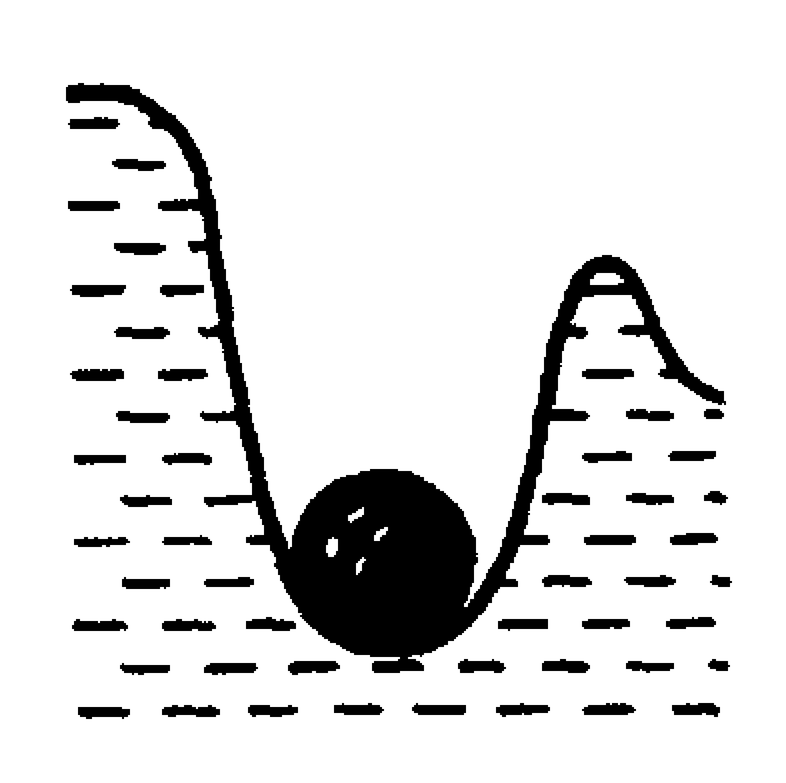
بالالكترون فيطير هذا فوق الحاجز الجهدى مباشرة ويجتازه ويصبح حرا فعلا . وهذه الطريقة الاعتيادية و« الكلاسيكية » فى اجتياز الحاجز الجهدى ، لا تختلف فى جوهرها باى شيء عن الطريقة التى يجتاز فيها الانسان سياجا ما .

ولا بد انكم قد لاحظتم بان الحاجز بالنسبة للالكترون فى المعدن لا يشبه تماما السياج : ففيه جانب امامى وليس هناك جانب خلفى ، فهو أشبه بدرجة السلم منه الى السياج . ويمكن صنع سياج للكرة فى الحفرة بحفر الارض بمحاذاة حوافها . ويمكن تكرار مثل عملية الحفر هذه فى حالة الالكترونات فى المعدن ، بايصال قطعة المعدن بمجال كهربائى قوى .

والآن اصبح كلا الحاجزان ، فى الحفرة للكرة وفى المعدن للالكترون ، متشابهين مع بعضهما البعض . ولكن تبدأ بعد ذلك اختلافات جذرية فيما بينهما .



شكل ٥

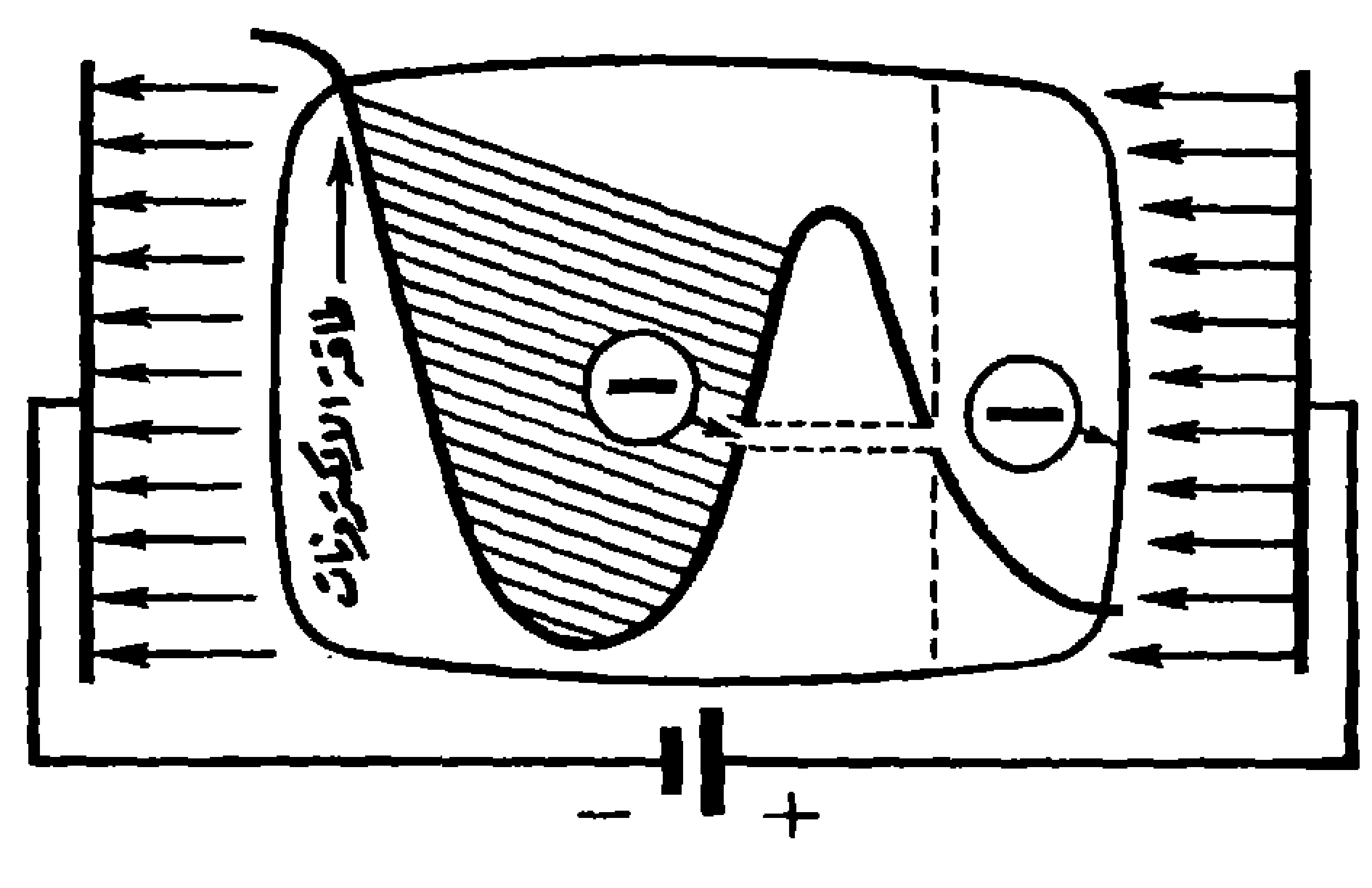


شكل ٦

وإذا ما قمنا بحلّ معادلة نيوتن للكرة فى الحفرة ، فيتبين بان الكرة ستبقى فى الحفرة الى الابد ما لم تكتسب الطاقة اللازمة لاجتياز الحاجز . ونحن نعرف ذلك دون اللجوء الى اية معادلة . فمتى سمع أحد من الناس بان الكرة تقفز من الحفرة بنفسها ، او ان يقفز الصبى الى الجانب الآخر من السياج دون ان يقوم باية حركة !

وتقول لنا الميكانيكا الكلاسيكية بثبات بان الكرة لا تستطيع الخروج من الحفرة بنفسها . واحتمال حدوث مثل هذه « المعجزة » يساوى الصفر دون جدال ــ فهو احتمال غير وارد اطلاقا ومستحيل !

ولكن اذا ما اردنا حلّ معادلة شرودنجر للالكترون فى المعدن الموضوع فى نطاق مجال كهربائى ، فسنحصل على نتيجة غير متوقعة . فان احتمال طيران الالكترون الى خارج المعدن سوف لا



شكل ٧

يساوى الصفر ، بل يمكن القول عن يقين ، بانه لا يساوى الصفر في اى مكان ! فهو احتمال ضئيل، وقد يكون فى منتهى الضآلة، ولكنه مع ذلك لا يساوى الصفر !

فيبدو ان الالكترونات قد اكتسبت امكانية « التسرب » عبر الحاجز الجهدى ! ثم تظهر من جانبه الآخر وكانها تسخر من ثبات تنبؤات الفيزياء الكلاسيكية . ويبدو كما لو ان هناك قوى خفية قامت بحفر « نفق » استطاع ان يتسرب فيها الالكترون دون ما جهد . وقد اطلق الفيزيائيون على هذه الظاهرة العجيبة تسمية « تأثير النفق » (the tunnel effect) .

العودة الى علاقة الريبة مرة اخرى

وبينما ننتظر بنفاذ صبر ان تفسر ميكانيكا الكـم « المعجزة » الجديدة ، يظهر على مسرح الاحداث جهاز القياس من جديد ويطلب الكلام . ويتألف كلامه مرة أخرى من معميات ليس لها بداية او نهاية .

وفى واقع الامر عهدت الى الجهاز مهمة مراقبة كيفية تسلل أو نفاذ الالكترون عبر الحاجز الجهدى ، لان هذا النفاذ يناقض فى جوهره المبادئ الاساسية للفيزياء الكلاسيكية . وانتم تعرفون مدى اهمية التأكد من أن ذلك لا يتعدى كونه لغوا يردده النظريون !

ولقد قلنا بان الطاقة الكاملة للكرة فى الحفرة ، التى تساوى

مجموع طاقته الحركية وطاقة الوضع ، هى سالبة . ويحدث ذلك لان طاقة الوضع للكرة (التى حسبناها من اعلى الحفرة ، اى من اعلى نقطة فى الحاجز الجهدى) هى سالبة وتزيد فى المقدار على الطاقة الحركية للكرة .

ومن المفهوم ان الطاقة الكاملة للكرة فى حدود الحاجز يجب ان تبقى سالبة ، فهى لا تتغير فى المقدار عند « النفاذ » . لكن طاقة الوضع تنقص الآن حتى تصبح الطاقة الكاملة فى اعلى نقطة من الحاجز مساوية للصفر .

والاستنتاج الوحيد من ذلك هو ان الطاقة الحركية للكرة فى حدود الحاجز اصبحت سالبة . لكن ما هو هذا المقدار ؟ لنكتبه فيما يلى :

$$ف_{حركية} = \frac{ك \times ع^{٢}}{٢}$$

ويكون مربع السرعة ع موجبا دائما مهما كانت علامته ، والرقم ٢ فى المقام يكون موجبا ايضا . وهذا يعنى بان كتلة الجسيم ك هى السالبة. ولكن الكتلة السالبة لا تفهم ولا يمكن للمرء ان يتصورها لا فى الفيزياء الكلاسيكية فحسب بل وفى ميكانيكا الكم ذات الاتجاه الاكثر « ثورية » . وفى الواقع ، ان هذا سيعنى ، مثلا ، بان قاطرة ما تتجه من موسكو الى لينينجراد ، بينما عربات القطار تبتعد فى الاتجاه المعاكس لحركة القاطرة اى من لينينجراد الى موسكو !

وهذا هراء ! وللتأكد من ان ذلك هراء حقا ، وضع جهاز القياس لتتبع حركة الالكترون .

ولنفرض ان الجهاز وجد الالكترون وأخذ يتتبع أثره . وها هو الالكترون قد بلغ حدود الحاجز الجهدى . ولغرض « ضبط » الالكترون فى لحظة تسلله عبر الحاجز لا يحتاج الجهاز حتى الى تثبيت موقع الالكترون ، بل يكفى التأكد من انه موجود فى مكان ما داخل الحاجز .

على ان هذا ليس كل ما فى الأمر . فعلى الجهاز ان يعرف ، بالاضافة الى ذلك ، سرعة الالكترون فى هذه اللحظة ، من أجل ان يتبين فيما اذا كانت طاقته الحركية ستصبح سالبة حقا . وهنا يقف الجهاز عاجزا عن العمل . وتبرز الى مسرح الاحداث علاقة الريبة (عدم التحديد) لهيزنبرج .

ولغرض تثبيت موضع الالكترون فى حدود الحاجز يجب انارته بالفوتونات ذات الموجات القصيرة ، لان تحديد موضع الالكترون يجب ان يتم بدقة لا تنقص عن عرض الحاجز نفسه . لكن اصطدام مثل هذا الفوتون بالالكترون يكسبه سرعة غير محددة محسوسة .

فما هى هذه السرعة ؟ انها ليست اكثر ولا أقل من كون الريبة (عدم التحديد) التى تولدها فى الطاقة الحركية للالكترون هى بالضبط فوق اعلى نقطة فى الحاجز !

وبتعبير آخر فان « ضبط » الجسيم اثناء تسلله غير الكلاسيكى تحت الحاجز غير ممكن اطلاقا . وفى عملية التسلل نفسها يكتسب

الجسيم طاقة كافية لعبوره الحاجز بطريقة كلاسيكية قانونية ومقبولة تماما . ويحدث ذلك كما فى حالة الشرطى الذى يساعد المجرم فى اخفاء الادلة الدامغة للجريمة !

ويتميز بهذا الوضع الى حد كبير الكثير من الظواهر فى عالم الاشياء المتناهية فى الصغر . وتستطيع ميكانيكا الكم ان تؤكد صحة اغرب الاشياء من وجهة نظر الفيزياء الكلاسيكية . ومن المستحيل من ناحية المبدأ ان نبرهن على زيف هذه التأكيدات باستخدام الاجهزة الكلاسيكية . ومن العبث البحث عن الجسيم تحت الحاجز اذ لا وجود له هناك . كما ان مفهوم الجسيم نفسه داخل الحاجز الجهدى عديم المعنى فى ميكانيكا الكم وكذلك فى الفيزياء الكلاسيكية ايضا .

وبالرغم من كل ذلك فان الجسيم يعبر الحاجز ! ويمكن تفسير هذه المعجزة ، فى نهاية الامر ، فى الصفات الموجية للالكترونات وغيرها من جسيمات المادة .

« موجات المادة » مرة اخرى

تظهر لنا هذه الصفات ، كما اوردنا سابقا ، بان سرعة الجسيمات تتوقف عن الاعتماد على موضعها . وينعدم المسار فى عالم الاشياء المتناهية فى الصغر . لكن طاقة الوضع تعتمد على موضع الجسيمات ، بينما تعتمد الطاقة الحركية على سرعتها .

وينتج من ذلك ، اذا اردنا الدقة فى التعبير ، انه لا يمكن ان نقيس فى وقت واحد الطاقة الحركية للجسيم وطاقته الوضعية . وهما لا تعتمدان فى كل لحظة الواحدة على الاخرى . وهكذا نجد مرة اخرى بان حدود تقبل هذه المفاهيم الكلاسيكية للطاقة فى عالم الذرات تعطى بواسطة علاقة الريبة .

وهكذا فان للجسيم الذى يتواجد فى حفرة الجهد احتمال ما فى الخروج منها . وهذا يعنى بانه يوجد احتمال ايضا ببقاء الجسيم فى الحفرة . فاذا كان لدينا مثلا الف الكترون ، ونفذ او تسلل عبر الحاجز عشرة منها ، فان احتمال حدوث تأثير النفق هو واحد بالمئة ، واحتمال عدم حدوثه هو ٩٩ بالمئة .

وقد اطلق الفيزيائيون على هذين الاحتمالين على التوالى تسمية القابلية الاختراقية والانعكاسية للحاجز الجهدى .

الاختراق والانعكاس ... انهما كلمتان مألوفتان ! اذ تتميز بهاتين الصفتين مختلف الاشياء من حيث قابليتها على انفاذ الموجات الضوئية . وفى الحد الفاصل بين شيئين مختلفين نجد أن الضوء يمر دائما فى الوسط الثانى بصورة جزئية ، وينعكس بصورة جزئية ايضا . ولكن ماذا نقول عن الحاجز الجهدى ، أليس هو حد يفصل بين وسطين ؟ نعم ، لكن ليس للموجات الكهرومغناطيسية (ومنها الضوئية) بل لموجات دى برويل .

وقد ظهر بان هذا التشبيه عميق جدا. اذ ان قوانين تأثير

النفق تنطبق بشكل رائع على قوانين انعكاس ونفاذ موجات الضوء عبر الحدود الفاصلة بين الاشياء المختلفة .

وليس من قبيل الصدفة اننا اخترنا لحديثنا مثال الحاجز بشكل « سياج » ، اى ان له عرضا محددا نهائيا . فاذا كان هذا الحاجز يمتلك جدارا اماميا فقط ، كما فى حالة درجة السلّم ، فان تأثير النفق يختفى كليا . وان الجسيمات لا تستطيع بناء الانفاق فى الحواجز الطويلة الى مالانهاية ولو كانت ضيقة جدا . وهنا يكون للتحريم الذى تطرحه الفيزياء الكلاسيكية قوة تامة .

وفى الواقع ان جهاز القياس كان سيستطيع الاحتفال بانتصاره « البائس » الذى يتمثل فى ثقته التامة بوجود الجسيم تحت الحاجز ، لو كان موجودا هناك ، ولاتهم درجة الريبة فى قياس موضعه . لكن ما دام الأمر كذلك فانه يمكن بواسطة علاقة الريبة ان نجد السرعة بدقة ، ومنها نجد الطاقة الحركية للجسيم . ونتبين بانها ذات قيمة سالبة قطعا .

لكن الطبيعة لا تريد ان تناقض نفسها بنفسها . فالطاقة الحركية السالبة هى شيء يستحيل وجوده . وبذلك يزول تأثير النفق نفسه .

ومع ذلك هل يمكن ان لا يقتنع احد بالتفسيرات الواردة . ربما يكون كل ما قبل اعلاه مجرد تأملات نظرية تجريدية ؟ فاحكموا بانفسكم . ان الالكترونات تتطاير من الخيط المعدنى الساخن « بقطعات » كبيرة ، لأن الطاقة الحرارية المنتقلة اليها كافية لتطايرها

عبر الحاجز في حد قطعة المعدن . بينما لا يطير اى الكترون من قطعة المعدن الساخن مهما بقى هناك .

ولكن حالما توضع هذه القطعة فى مجال كهربائى قوى حتى تبدأ الالكترونات تتطاير منها مرة ثانية . وتؤكد هذه الظاهرة التى سميت بالابتعاث البارد (cold emission) ، وبشكل رائع ، بان تأثير النفق لم يولد من بنات خيال علماء الفيزياء النظريين .

دالة الموجة

لم يكتب أحد ما معادلة لغرض التسلية المجردة . فالمعادلات توضع من اجل ايجاد حلول لها . ولا تستثنى من ذلك معادلة شرودنجر التى تحدثنا عنها من قبل ، فى هذه الناحية . وتكون المعادلات بسيطة ومعقدة . لكن معادلة شرودنجر تعتبر بلاشك من المعادلات المعقدة . وهى معادلة تفاضلية جزئية من الدرجة الثانية . ويتطلب شرح ذلك كلاما كثيرا ، مما لا يسعه نطاق هذا الكتاب . وسنكتفى بالقول بان المعادلات التى من هذا الطراز تستعمل لوصف المقادير المتغيرة فى الفراغ والزمن .

والمقدار المجهول فى هذه المعادلات يمكن ان يختفى بانواع الاشكال : فقد يكون بشكل سطح سائل فى وعاء ، او احداثيات صاروخ يطير فى الفضاء الخارجى ، او بقوة اشارة لاسلكى تنتقل من جهاز الارسال الى جهاز الاستقبال ، او سرعة قطع آلة قاطعة ،

وغير ذلك من الامور الكثيرة . ويعطى حلّ المعادلة بشكل مباشر بعلاقة المقدار المطلوب بالمقادير الاخرى التى تهم العلماء . ويسمى علماء الرياضيات جميع هذه العلاقات باسم الدوال (functions).

فما هو المقدار المجهول ، والذى لا يمكن تحديده ، الممثل فى معادلة شرودنجر ؟ لقد اطلق الفيزيائيون عليه تسمية الدالة الموجية . ولا يزال معناها الدقيق غير واضح بالنسبة للعلماء حتى الوقت الحاضر بالرغم من اجراء آلاف الحسابات الجيدة عليها . ولقد قلنا سابقا بان العلماء لا زالوا يتجادلون بشأنها مع بعضهم البعض حتى يومنا هذا .

ولكنهم يتفقون جميعا فى شيء واحد وهو ان مربع دالة الموجة يتضمن معنى الاحتمال. واعتماده على الاحداثيات والزمن يولد احتمال وجود الجسيم فى مكان ما من الفراغ فى الزمن المعطى . واذا ما اردنا الدقة فى التعبير نقول بامكان احتمال العثور على الجسيم فى مكان ما وفى زمن ما اعتمادا على التأثير (الفعل) الذى يحدثه هناك . ولنأخذ على سبيل المثال تأثيره المتبادل مع جهاز القياس . وهذا الاحتمال هو نفسه « موجة الاحتمال » التى ذكرناها سابقا لدى الحديث عن تجربة حيود الالكترونات .

ان حلّ معادلة شرودنجر فى الحالة العامة هى مهمة صعبة جدا ، حتى لو استخدمت لهذا الغرض احدث طرق الرياضيات العالية . ولكن هناك مجال واسع للظاهرة يجعل الحلّ اكثر سهولة . وهو ما

يسمى بالمشاكل المستقرة (stationary problems) التى تتردد فيها دالة الموجة المطلوبة حول شكل معنى « وسط » فقط ، بينما لا يتغير هذا الشكل نفسه بالزمن .

ومن السهولة معرفة ان هذه المشاكل لا علاقة لها بالعمليات (غير الدورية طبعا) . ففى العمليات لابد وان يكون هناك شيء موجه ، ويتغير بمرور الزمن . ان المشاكل المستقرة تتعلق بتركيب وبناء الانظمة التى يمكن ان تحدث فيها العمليات . ومعرفة التركيب أمر مهم جدا فلا يمكن قول اى شيء عن العمليات اذا لم نعرف الظروف التى تحدث فيها .

وتتمثل تفاصيل هذه « الظروف » فى عالم الاشياء المتناهية فى الصغر فى الذرات والجزيئات والبلورات وكثير غيرها من الاشياء . ومن المعروف ان تركيبها يتميز بديمومة رائعة . وقد استخدمت فيها لاول مرة معادلة شرودنجر . وسنتحدث فى الباب القادم عن النتائج الهامة التى حصلنا عليها عند ذاك .

الموجات والكمات تتحد

تتصف المشاكل المستقرة فى ميكانيكا الكم بصفة هامة أخرى . ولادراكها نعيد الى الاذهان ان علاقات الريبة تشمل لا موضع وسرعة الجسيمات فقط ، بل وطاقتها الكاملة والزمن .

وفى الحالة الاخيرة تنص علاقة هيزنبرج على انه يمكن قياس طاقة الجسيم هناك بدقة اكبر كلما طالت فترة القياس . وتكتب هذه العلاقة بشكل يشبه كثيرا ما اوردناه سابقا :

$$\Delta \text{ق} \times \Delta \text{ن} \geq h$$

(وهنا تصح ايضا كتابة $h/2\pi$ بدلا من h) . وتمثل Δ ق هنا مقدار الريبة فى طاقة الجسيم ق ، اما Δن فتمثل الريبة فى تلك اللحظة من الزمن ن . اما العلاقة ≥ فهى تعنى ايضا بان حاصل ضرب مقادير الريبة هذه لا يمكن ان يكون اقل من مقدار ثابت بلانك h .

والآن ، ان الاستقرار يعنى بان طاقة الجسيم لا تتغير مع الزمن . لذا فيمكن من حيث المبدأ قياسها ولو الى مالا نهاية : فالريبة هنا فى لحظة القياس لا تلعب ، بلا شك ، اى دور .

وهذا يعنى ان بامكاننا ان نجعل باطمئنان $\Delta \text{ن} = \infty$. ولكننا نجد عندئذ بموجب قوانين الرياضيات ان :

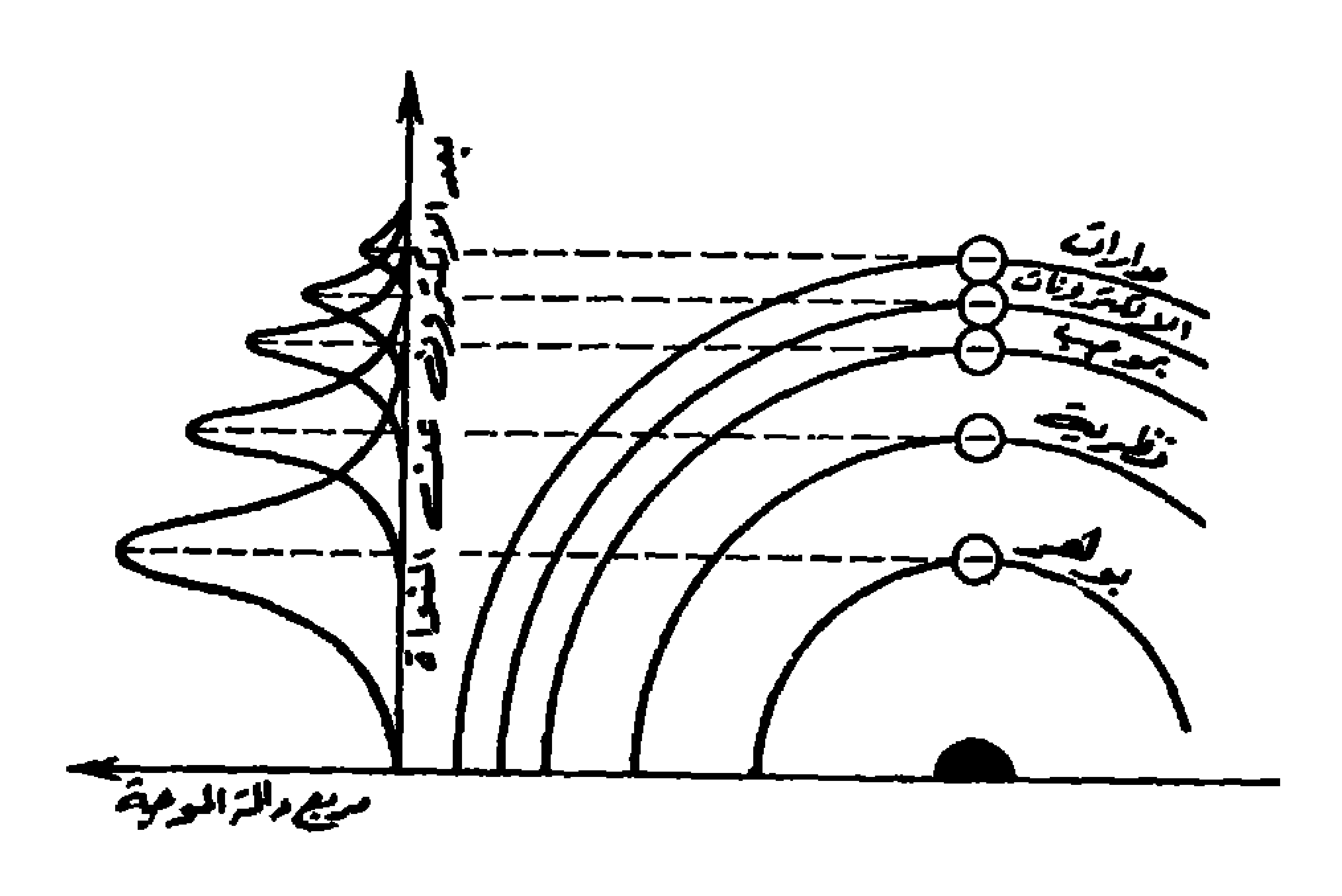
$$\Delta \text{ق} = \frac{h}{\Delta \text{ن}} = \frac{h}{\infty} = \text{صفر}$$

اى ان الريبة فى قياس الطاقة تعادل الصفر . وبتعبير آخر ان طاقة الجسيمات تتحدد فى الاوضاع المستقرة بدقة مطلقة ! وهذا هو بالذات الظرف الرائع الذى ذكرناه قبل قليل .

وتشارك هذه القيم ف للطاقة فى حل معادلة شرودنجر بصورة نشيطة جدا . فما دامت ف هى قيمة موجبة (وذلك ، كما نعرف ، يتجاوب مع الحركة الحرة تماما للجسيمات) فانه يكون لمعادلة شرودنجر حلّ لانهاية له لجميع قيم ف .

وهذا يعنى بان مربع هذا الحلّ (احتمال) لا يساوى الصفر ايضا مهما كانت قيم ف . وبترجمة هذا الكلام الى لغة مبسطة فانه يعنى بان الجسيم الحرّ يستطيع ان يمتلك اية الطاقة واية سرعة فى الحركة (على ان لا تزيد طبعا عن سرعة الضوء) .

ولكن عندما تكون قيمة ف سالبة (وهذا يناظر ايضا ، كما نعرف ، حالة تقيد الجسيم ، كما فى مثال الكرة فى الحفرة او



شكل ٨

الالكترون فى الذرة) ، فان حلّ هذه المعادلة يتغير الى حدّ كبير اذ يتبين بانه لا يؤول الى الصفر الا فى قيم خاصة معينة للطاقة ق .

وتدعى قيم ق هذه بالمستويات المسموح بها (الممكنة) لطاقة الجسيم . انظر الى الشكل (٨) ، فسترى ان احتمال بقاء الجسيم يساوى الصفر تقريبا فى كل مكان ، ما عدا الحالة التى يكون للجسيم فيها طاقة مسموح بها . ففى مثل هذه الحالات لا يساوى الاحتمال المذكور الصفر بشكل ملحوظ . ويسمى الفيزيائيون هذه الحالة بانفصال مستويات الطاقة .

ولندرس ذلك بدقة اكبر . الا تذكر القارئ هذه الصورة للمستويات المسموح بها للطاقة بنموذج الذرة فى نظرية بوهر ؟ بالطبع ، بل هى وتلك شيء واحد . والمسارات الالكترونية لدى بوهر هى نفس حالات الطاقة التى يكون احتمال وجود الالكترون فيها لا يساوى الصفر !

لكن بوهر قد « اخترع » هذه المسارات ، إلا ان لم يستطع ان يثبت سبب ضرورة وجودها . وها هى ميكانيكا الكم تضع الاساس تحت هذه النبوءة .

كما انها اثبتت مسلما آخر لبوهر حول الطبيعة الكمية لقفزات الالكترونات فى الذرة . فالالكترون ، كما نرى من حل معادلة شرودنجر ، يمكن ان يتواجد فى الذرة فقط فى الحالات التى تكون له فيها طاقة مسموح بها . وهذا يعنى بانه عند القفز من حالة ما

كهذه الى حالة أخرى فان طاقته لا تتغير كيفما اتفق ، ولكن بموجب مقدار معين . وهو يساوى بالضبط الفرق فى الطاقة فى هاتين الحالتين التى يتم القفز فيما بينهما .

وفرق الطاقة هذا هو نفسه كمّ بلانك الذى ارسى بداية تطور الفيزياء الحديثة ! وقد وحدت ميكانيكا الكم نبوءتين عظيمتين وهما : نبوءة بلانك حول كمات الطاقة ، ونبوءة دى برويل حول موجات المادة . اذ اظهرت العلاقة المتبادلة العميقة الجذور فيما بينهما .

فبدون موجات دى برويل لا يمكن ان تبقى كمات بلانك !

وقد التقى هذان الجدولان الصغيران للتنبؤات الجديدة فى نهاية الأمر ليكونا نهر المعرفة الموحد العظيم .

فلنتتبع مجرى هذا النهر الذى يتوسع باستمرار ولنطلع الى المناظر الطبيعية الآخاذة التى تنكشف على ضفتيه .

الذرات والجزيئات والبلورات

السحابة بدلا من المدار

لم يعرف اى مجال من مجالات الفيزياء مثل وتائر التطور السريعة التى عرفتها ميكانيكا الكمّ . فخلال خمسة اعوام بعد مولد افكار دى برويل تمّ وضع طرق ميكانيكا الكم وجهازها الرياضى فى كافة السمات الرئيسية ، وجرى الحصول على نتائج ذات اهمية علمية كبيرة ، كما جرت محاولات بعيدة المدى فى دراسة واستيعاب مغزى هذه النتائج .

وعند حلول عام ١٩٢٨ كانت ميكانيكا الكم تقف امام ابناء العصر المبهورين كعلم ناضج متكامل البناء ، وقائم بذاته ، له اساس وطيد متعدد الاشكال بدرجة لا تقل عما عليه الحال فى الميكانيكا الكلاسيكية . لكن الاخيرة احتاجت لتطورها الى اكثر من مائتى عام ، بينما تم وضع ميكانيكا الكم خلال خمسة اعوام . فهذه هى وتائر التطور فى القرن العشرين !

وكما يحطم السيل الجارف السد ثم يغمر الانحاء بهدوء مكونا بحيرة واسعة ، فان ميكانيكا الكم بالمثل أخذت بعد فترة

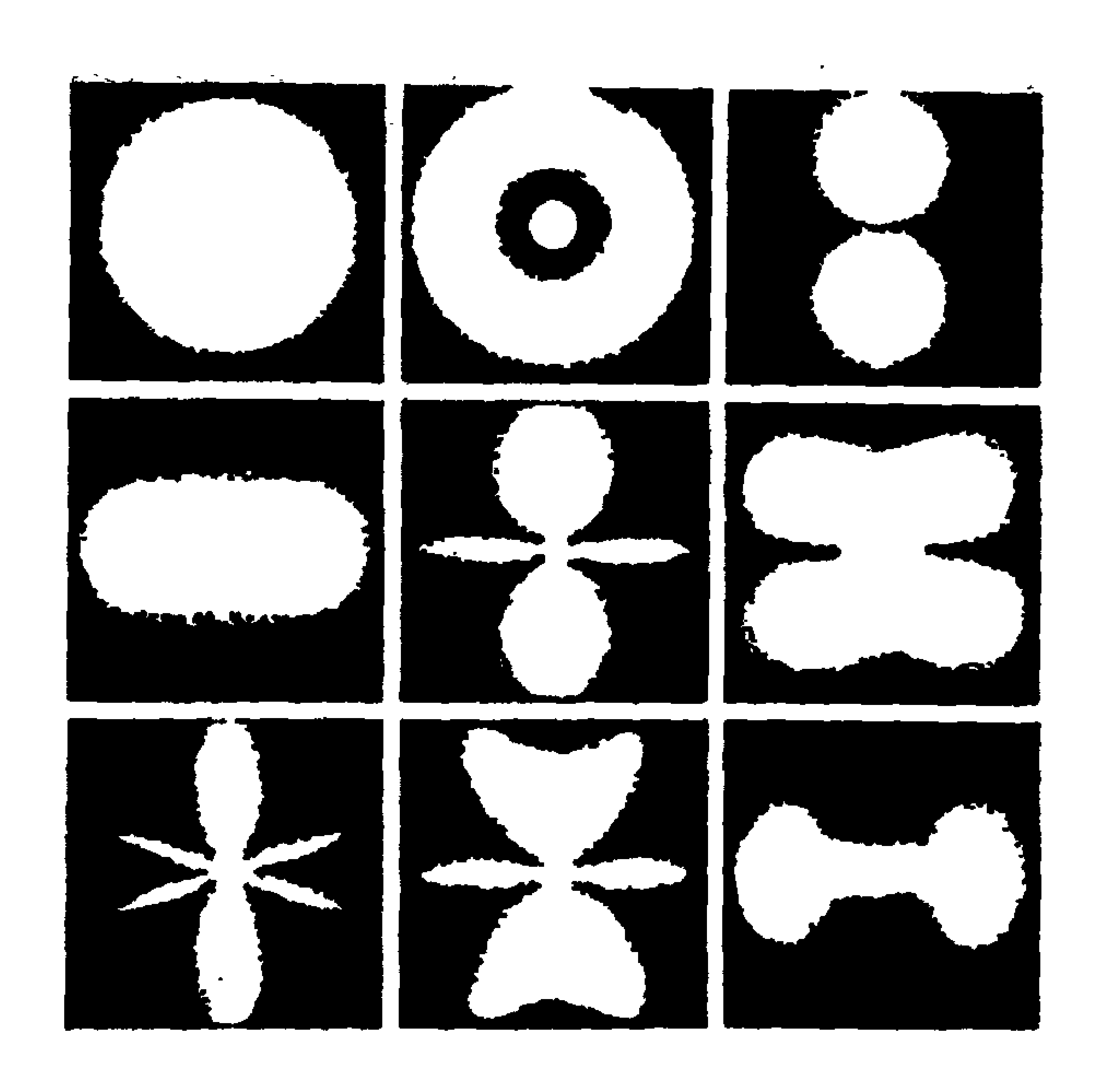
السنوات الخمس « العاصفة » تنتقل الى فترة من التطور اكثر هدوءا . وبدأت شيئا فشيئا تجذب فى نطاقها مجموعات جديدة وجديدة من الظواهر ، فتقوم باستيعابها واكسابها معنى صحيحا .

وبالطبع فان اول غنيمة حصلت عليها ميكانيكا الكم هى الذرة . فمن الذرة بدأ تطور الفيزياء الحديثة لبلانك وبوهر . وان ميكانيكا الكم ابدت اهتمامها بالذرة قبل اى شىء آخر .

وكانت مهمتها الاولى اعادة النظر مرة أخرى فى تركيب الذرة . فادخل بوهر مفهوم المدارات الالكترونية . وهى ، كما نعرف ، مسألة ترضاها الفيزياء الكلاسيكية . بينما ترفض ميكانيكا الكم تماما مفهوم المدار . فالمدار هو فى الواقع مسار حركة الالكترون فى الذرة . وليس من قبيل الصدف ان تؤكد ميكانيكا الكم بانه من العبث تصور الجسيمات فى عالم الاشياء الدقيقة .

فما هو بديل المدارات ؟ انه ليس الا توزيعات احتمالات تواجد الالكترون فى الذرة . ونحن نعرف بان الطاقة الكاملة للالكترون فى الذرة تتحدد ببعده عن النواة . ان مجموع الطاقات المسموح بها يناظر مجموع المسافات المسموح بها من النواة .

ومع ذلك فلدينا شعور يمنعنا من الاستغناء عن فكرة المدار كليا ، لانها تسهل كثيرا قضية توضيح الذرة. كما ان ميكانيكا الكم تتجاوب مع الضعف الانسانى ، فتسمح بذلك وتقول : « حسنا، اذا كان الامر ضروريا لكم الى هذا الحد، فاحتفظوا بفكرة المدار .



شكل ٩

وارسموا منحنى بين النقط التى يكون فيها احتمال تواجد الالكترون بالطاقة المذكورة المسموح بها على اكبره . واعتبروا هذا الخط هو المدار الذى تطلبونه . ولكن تذكروا بان الالكترون ليس نقطة فيمكن ان تمحيه موجته الخاصة . لذلك فان المدار هذا ليس الا ضربا من الخيال » .

حسنا ، ونحن نقدم الامتنان لميكانيكا الكم على ذلك . فلنرسم المنحنى ، ولنفرح بمجموعة الخطوط المنحنية الجميلة . وعندئذ

تضيف ميكانيكا الكم المتسامحة قائلة : « اتعرفون ما الذى يجعل هذه المدارات تثير الاهتمام ؟ لقد ظهر بانها جميعا مرتبة بحيث يوضع على طولها عدد متكامل من موجات دى برويل الالكترونية . فتوجد على المدار الاول القريب جدا من النواة موجة واحدة ، وعلى المدار الثانى موجتين ، وعلى الثالث ثلاث موجات وهكذا » .

وهذا مهم جدا فى الواقع ويفيد كدليل جديد على المحتوى « الشامل » لموجات دى برويل .

لكن ميكانيكا الكم لا تدعنا نقف ونتأمل ، فتعاجلنا بالقول : « كفى ، لقد استمتعتم بالنظر الى المدارات الجميلة ، ويكفيكم ذلك . انسوها — اذ لا وجود لها فى الواقع . وينبغى عليكم ان تتصوروا بدلا من الالكترون فى المدار « سحابة الاحتمال » . وهذه هى صورة الالكترون فى الذرة . وتكون السحابة اكثر كثافة فى الاماكن التى يكون احتمال تواجد الالكترون فيها اكبر ، اما فى الاماكن الاخرى فتكون اكثر شفافية . فانظر الصور الفوتوغرافية لهذه السحب ! »

صور فوتوغرافية ؟ أيعنى هذا انه تمكنتم مع ذلك من تصوير الالكترونات الصفرية ؟ لا ، لا تسرعوا فى اظهار فرحكم : فلا يمكن التخلص من علاقة الريبة باى شكل من الاشكال . وهذه ليست الصور الفوتوغرافية للذرات بل لنماذج خاصة من الدخان ، تشبه ظاهريا توزيع كثافة « سحب الاحتمال » لالكترونات الذرة .

ويبدو فى الصورة ان لسحب الالكترون اشكال مختلفة . فبعضها على شكل كرات وبعضها ممدودة وتشبه السيجار . ان هذا الاختلاف ناجم عن ان طاقات الالكترون فى الذرات لا تعتمد على المسافة التى تبعد بها عن النواة فقط .

وبالمناسبة فان هذا القول يصح على أبسط الذرات وهى ذرة الايدروجين . ففى هذه الذرة يكون الالكترون الوحيد موجودا فى مجال النواة . والعلاقة المتبادلة بينهما هى علاقة جسيمين مشحونين متشابهين فى المقدار ومختلفين فى الاشارة .

وكما نعرف فان هذه العلاقة المتبادلة قد وصفها قانون كولوم (Coulomb) . وتتوقف هذه العلاقة المتبادلة لا على المسافة بين الالكترون والنواة فقط . ويفهم من هنا السبب فى ان سحابة الالكترون فى ذرة الايدروجين لها شكل غلاف الكرة : فان جميع نقاط سطح الكرة تكون موجودة على مسافة واحدة من مركز الكرة — وفى حالتنا هذه النواة . ولذلك فان جميع نقاط سحابة الالكترون تستجيب لنفس طاقة الالكترون .

وعندما تظهر فى الذرة الكترونات اضافية فان صورة التأثير الكهربائى المتبادل فيما بينها وبين النواة تفقد شكلها « البدائى » ، كما فى ذرة الايدروجين . فالالكترونات هنا لا تنجذب نحو النواة فقط ، بل وتندفع عن بعضها البعض .

ومما لا شك فيه انه فى العائلة الكثيرة الالكترونات ، وهذا هو

حال الذرة المعقدة ، تكن جميع الالكترونات ، رغم عدائها لبعضها البعض، حبا شديدا لمركز العائلة اى النواة . وتستفيد الطبيعة بحكمة من هذه العلاقات المتبادلة ، وتقيم نظاما رصينا فى العائلات الذرية .

اما كيف يبدو هذا النظام فيمكن معرفة ذلك الآن لدى النظر الى الصور الفوتوغرافية التى جرى عنها الحديث . فان سحب الالكترونات تعقد شكلها كثيرا ، وتتغلغل الواحدة فى الاخرى بصورة متشابكة . ولو تسنى لنا تجسيم هذه الصورة ثم تلوينها بمختلف الالوان ، لاثار عجبنا جمالها الاخاذ ! نعم انها لا تشبه فى شىء الصورة الجامدة لمدارات الالكترون .

تغاير ذو وتيرة واحدة

ان ما يسرّ النظر ، يجلب التعب للعقل . فكيف يجد المرء طريقه فى السحب الالكترونية المتشابكة بصورة معقدة ، ومن أين له ان يعرف اين تبدأ هذه السحابة واين تنتهى الاخرى ؟

علينا لتحقيق ذلك ان نلقى نظرة على مرسم « المهندس المعمارى الذرى » ـ اى الطبيعة ـ لندرك كيف يصمم ويبنى هذه الابنية المصغرة الجميلة والمتينة التى هى الذرات .

والمادة الانشائية التى تستخدمها الطبيعة فى بناء الذرات معروفة ، وهى الالكترونات والنوى . كما هو معروف ايضا الاسمنت الذى

يوحدها سوية : وهى قوة جاذبية الالكترونات للنواة ذات الشحنة المعاكسة .

وها نحن فى مرسم هذا المهندس المعمارى . واول ما يجذب انتباهنا هو جدول ضخم يشغل الجدار كله . وستعرفونه بسهولة ، فهو الجدول الدورى للعناصر الكيمياوية الذى وضعه منديلييف . وقد ملئت فيه حتى الآن ١٠٤ مربعات — تمثل ١٠٤ عناصر كيمياوية .

وتقوم الطبيعة بالاعتماد على هذه « التصاميم النموذجية » المئة واربعة ، ببناء الالوف المؤلفة من البنايات فى مختلف ارجاء الكون . وهناك اكثر من مئة « تصميم » مرسوم على ورق الخرائط الهندسية الازرق اللون !

ولكن ... لا علينا الاسراع باظهار الحسد لتعدد الاشكال الذرية — فهى تبدو كذلك لدى النظرة الاولى فقط . ان الطبيعة تبنى بصورة اكثر اقتصادا من اكثر المهندسين المعماريين تدبيرا .

ولنشرح قبل كل شيء ذلك المبدأ الاساسى الذى يسترشد به المهندس المعمارى الذرى فى وضعه لبنات صرح الذرة . وقد اكتشف هذا المبدأ العالم السويسرى ولفجانج باولى (Wolfgang Pauli) فى سنوات ظهور ميكانيكا الكم، وسمى باسمه .

ويصلح هذا المبدأ لا بالنسبة للذرات فقط ، بل ولكثير من المجموعات الاخرى من جسيمات عالم الاشياء الدقيقة . وينص مبدأ

باولى على انه : فى اية مجموعة من الجسيمات الدقيقة للمادة لا يمكن ان تشغل كل حالة للطاقة المسموح بها اكثر من جسيم واحد .

وفى الحقيقة أتضح فيما بعد ، بان هذا المبدأ غير شامل بصورة مطلقة ، كما لا يصح لكثير من اصناف الجسيمات الدقيقة . وسنورد التحفظات الضرورية بهذا الشأن اثناء سير الحديث ، اما الآن فسنشير بان هذا المبدأ صالح بالنسبة للالكترونات مهما كانت « المجموعات » التى تكونها .

هذا وان « المجموعة » الالكترونية هنا تعتبر الذرة . والذرة الاخرى هى « مجموعة » أخرى . ولكن العائلات الالكترونية فى جميع ذرات اى عنصر كيمياوى تشبه الواحدة الاخرى كقطرتى ماء . (ونحن نعترف هنا بان تشبيهنا غير موفق . فما دقة تشابه قطرتى ماء بالمقارنة مع تطابق ذرتين . واظن ان الناس سيقولون بهذا الشأن فى المستقبل : انهما متشابهان مثل زوج من الالكترونات !) .

معجزة اخرى – لكنها لم تفسر بعد

لنعد الى « الفن المعمارى الذرى » . وبالمناسبة ، اننا سنضطر مرة ثانية الى الابتعاد عن الموضوع ، من أجل الحديث عما يسمى باللف المغزلى (spin) للالكترون * .

---

* وسنسميه فى باقى اجزاء الكتب باللف فقط . وقد ورد فى بعض المراجع العربية باسم الدرور او الدوران الذاتى (المترجم) .

وسنشرح فكرة اللف فى بابين قادمين . اما الآن فسنكتفى بالقول بانه من المستحيل فهم اللف بشكل تام انطلاقا من قوانين الفيزياء الكلاسيكية . وقد اعتقد من اكتشفه بسذاجة بان اللف يمكن ان يرتبط بشكل ما « بالدوران الذاتى» للالكترون .

هل تدور الارض حول الشمس ؟ نعم ، تدور . وبالاضافة الى ذلك فانها تدور حول محورها نفسها .

ويدور الالكترون حول النواة غير انه ايضا يمكن ان يدور حول محوره فى نفس الوقت .

هل فهم هذا « الشرح التوضيحى » ؟ والآن سنضطر الى تركه جانبا .

هل الالكترون يدور حول النواة ؟ كلا ، مطلقا . ان حركة الالكترون فى الذرة هى اكثر تعقيدا من ذلك بكثير . وان محاولة تصوره بمساعدة المفهوم « الكلاسيكى » للدوران يعنى تقديم نسخة بائسة ومشوهة لواقع حال الاشياء .

هل يدور الالكترون حول محوره الخاص ؟ ليس هناك من شىء ابعد عن الواقع من هذه الفرضية . ثم ما هو « محور » الالكترون ؟ فان ميكانيكا الكم تصوّر الالكترون لا بشكل كرة بل كنقطة * .

---

* من الواضح ان هذا التصور غير دقيق ، ولكن ميكانيكا الكم لا « تستطيع » العمل مع تصور آخر . وسنشرح ذلك بالتفصيل فى الباب الاخير .

والقول : « محور » النقطة هو ضرب من الهراء ! اما « دوران » النقطة حول نفسها فهذا شيء يستحيل تصوره !

وبذلك نجد انه لا يمكن تكوين اية صورة واضحة حول لف او دوران الالكترون . وفي الحقيقة اننا لن نحصل ابدا على صورة مقنعة جدا حول الجسيم — الموجة (الالكترون) والموجة — الجسيم (الفوتون) .

ويظهر وجود اللف بالنسبة لالكترون الذرة في انه تضاف الى عزم كمية التحرك (عزم الدفع) للالكترون التي يكتسبها في حركته في الذرة بالقرب من نواة الذرة ، كمية ما تعود الى الحركة الذاتية للالكترون . وبكلمة أخرى ان هذه الكمية لا ترتبط ، بكون الالكترون يتحرك قرب النواة ام انه يتجول « شبه حر » في قطعة من المعدن ، ام انه يتحرك في نهاية الامر بصورة حرة تماما ، من الناحية العملية ، في الفضاء بين الكواكب . ويكون مقدار لف الالكترون واحدا دائما ، ويوجد دائما « مرتبطا » بالالكترون .

وقد تبين بان لف الالكترون في الذرة يمكن ان يضاف الى عزم كمية التحرك للالكترون الذي يتجاوب مع حركته بالقرب من النواة ، او يطرح منه . ويمكن التعبير عن ذلك بكلمات اخرى وهي ان كلتا قيمتي عزم كمية التحرك التام للالكترون ، يبدو وكأنهما تتجاوبان مع الحركات الذاتية المعاكسة للالكترون ، والتي هي في

واقع الامر لا تختلف عن بعضها البعض . ولذلك فان لتعبير « من حيث الجوهر » معنى دقيق وهو : ان لكلتا هاتين الحركتين المذكورتين طاقة واحدة في الذرة لا تتأثر باية قوى خارجية .

وفي النتيجة فان يمكن ان يشغل كل مستوى للطاقة المسموح بها في الذرة لا الكترون واحد ، بل الكترونان لهما لفان متجهان في اتجاهين متضادين . وهذا هو التدقيق الاول الذي يطرحه مبدأ باولي .

« المهندس المعماري الذري »
اثناء عمله

والآن لنعد الى مرسم « المهندس المعماري الذرى » . ولنتجول في معرضه « للتصاميم الموحدة » او الطبعات الزرقاء (blue prints) .

« الطبعة الزرقاء » رقم ١ . ذرة الايدروجين . انها لم تعد تثير اهتمامنا . فان تركيب هذه الذرة « بسيط » جدا ! رغم ان العلماء قد وصلوا الى هذه البساطة خلال اكثر من قرن .

و« الطبعة الزرقاء » رقم ٢ تمثل ذرة الهيليوم . ويبدو بانه لا يمكن ان يوجد فيها ما يثير الاهتمام . وقد اوضحنا قبل قليل بان كل سحابة الكترونية يمكن ان تتكون من الكترونين . وهذا يعني بان ذرة الهيليوم لا تختلف كثيرا عن ذرة الايدروجين . ولنتأمل « النموذج الجاهز » : فيتضح لنا الامر . اذ ان السحابة الالكترونية اكثر

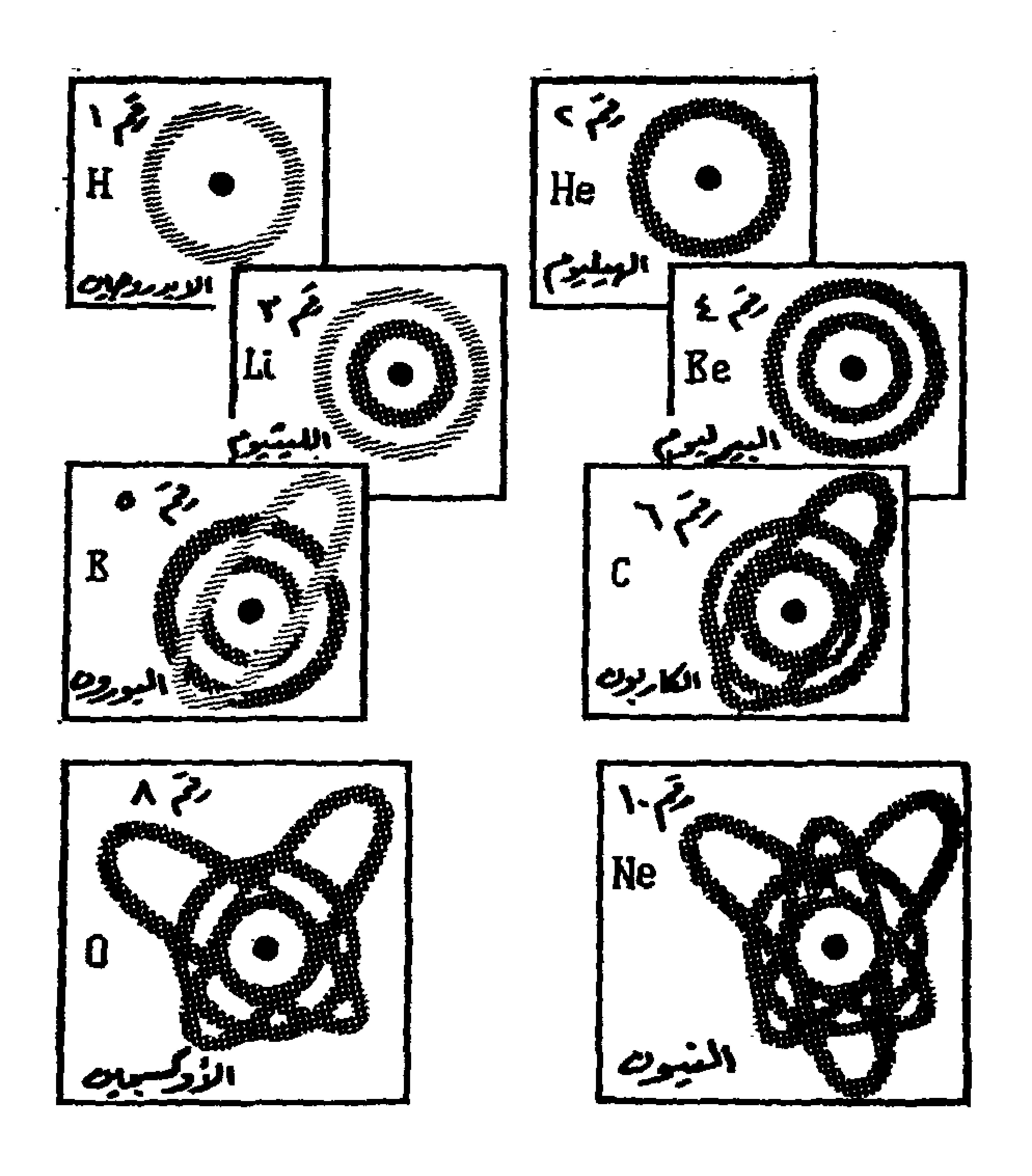
كثافة بمرتين . وهى تتألف الآن لا من الكترون واحد فحسب ، بل من الكترونين .

ونلاحظ فى ذرة الليثيوم (الطبعة الزرقاء رقم ٣) تكون سحابة الكترونية اخرى كروية الشكل ، توجد داخلها الذرة الاولى اى ذرة الهيليوم . وهذا امر مفهوم ، فان مبدأ باولى لا يسمح بان يكون فى كل « شقة » للطاقة الذرية اكثر من الكترونين .

ويظهر ساكن آخر « فى الطابق الثانى من الشقة » فى الذرة التالية لليثيوم وهو البريليوم . وحتى هذا الوقت يجرى السكن فى البيت الذرى حسب الاصول .

ولكننا ننتقل بعد ذلك الى الطبعة الزرقاء رقم ٥ فنجد فيها ذرة البورون . فيظهر لنا بان المهندس المعمارى الذرى قد وجد عذابا كثيرا فى ايجاد محل لساكن جديد . فكان عليه ان يقتصد فى مساحة البيت الذرى وان يضع الساكن ـ الالكترون بشكل يضمن عدم التقاءه بالساكنين الآخرين قبله بشكل مستمر . فالمعروف ان الساكنين الذريين لا يودون بعضهم البعض . وهم يعانون من النفور المتبادل فيما بينهم وبالرغم من سكناهم فى شقة واحدة ، فانهم يفضلون عدم الالتقاء ببعضهم ، ويتحركون فى اتجاهات متعاكسة .

وقد وجد المهندس المعمارى الذرى حلا « عصريا » جدا : اذ ثبت شقة داخلية عبر جميع طوابق البيت الذرى وانزل فيها الساكن الخامس ! ويبدو ان هذا الحل قد اعجب المهندس المعمارى ، لذا



معرض الفن المعمارى الذرى

شكل ١٠

فانه فى تصميمه التالى ـ ذرة الكربون ـ اضاف ساكنا ثانيا الى هذه الشقة شبه العمودية .

وليس هناك فى الطبعات الزرقاء الاربع الاخرى اى شىء جديد . فان المهندس المعمارى قد تبنى بجد فكرة « الشقق بين الطوابق »

فاضاف شقتين اخريتين تميل بزاوية قدرها ١٢٠ درجة على الشقة الاولى وعلى بعضهما البعض .

هذا هو السبيل الذى لجأت اليه الطبيعة من أجل تحقيق اهدافها باى شكل كان ، فى اسكان الجيران الذين يحبون الشجار فى حيز ضيق من البيت الذرى . على ان المهم هو انهم اوقفوا الشجار ، ولا يرغبون فى تبديل محل سكناهم ، وهذا شىء هام جدا بالنسبة لمتانة البيت الذى يعيشون فيه . لان الطبيعة لا تبنى الذرات من أجل يوم واحد !

ويتجلى امامنا هنا فى اعقاب مبدأ باولى ، مبدأ عام آخر ، تسترشد به الطبيعة فى بناء الذرات . وهو مبدأ أفضل توزيع للطاقة .

ان التنافر المتبادل بين الالكترونات لابد وان يؤدى الى زيادة طاقة الوضع للذرة بشدة . لكن فى الطبيعة كلما يكون تركيب الشىء اكثر ثباتا ومتانة كلما تنقص طاقته الوضعية . فاذا ما سقطت من الطابق العاشر الى الارض ، فان الطبيعة العديمة الاكتراث لا تشفق عليك ابدا ، لكنها لا تتوانى عن ابداء رأيها قائلة : « ها انت الآن تشعر بثبات اكثر ! »

ويتجلى نفس هذا الميل للثبات فى عالم الذرات ايضا . وتكون الذرة اكثر ثباتا من غيرها اذ كان فيها أقل قدر ممكن من الطاقة الوضعية . وقد بذلت الطبيعة فى وضع « الطبعات الزرقاء » الخاصة بها

للذرات جهودا كبيرة للقضاء على التنافر المتبادل بين الالكترونات، وعوضت عنه بمهارة بقوة جذب الالكترونات العامة نحو النواة .

وحتى الوقت الحاضر نجد ان مبدأ افضل توزيع للطاقة فى الذرات قد ظهر متمثلا فى التخطيط الداخلى العجيب لتركيب الذرات فقط . ولكن مهلا فانه سيظهر فى توزيع مساحة السكن فى الذرات التى لا تقل عما سبق غرابة .

الذرات المخبولة

لقد بحثنا مبدئين اساسيين فى انشاء واسكان الابنية الذرية . وهما مبدأ باولى ومبدأ افضل توزيع للطاقة .

فبم تتجلى الطبيعة الموجية للالكترونات ؟ هل فى وجود « سحب الاحتمال » المشحونة بدلا من المدارات الالكترونية فى الذرة ؟ لكن الامر ليس بهذا الحال . اذ تتصف موجات دى برويل بميزة رائعة اخرى . وهى انها تحدد « سعة » الابنية الذرية .

ولنتذكر بان السحب الالكترونية تتصف فى كونها تتسع لعدد كامل من موجات دى برويل . وقد ظهر بان هذا العدد لا يتحدد بـ « رقم » المدار السابق فقط بل وبكثافة السحابة الالكترونية ، التى تولدها جميع تلك الالكترونات ، التى تتسع سحاباتها لعدد واحد من موجات دى برويل الخاصة بها .

ولم يحالف التوفيق الفيزيائيين لدى تسميتهم مثل هذه السحابة

الالكترونية « الموحدة » (ويمكننا ان نحدس الآن بانها تتألف من عدد من السحب « الزوجية ») بالقشرة . وقد حددت ميكانيكا الكم ايضا العلاقة بين سعة القشرة ، اى اكبر عدد من الالكترونات تحتويه — ن، و « رقم » القشرة، اى عدد الموجات الالكترونية الموجود فيها —ں. ويكون لهذه العلاقة الشكل البسيط التالى :

ن $\times$ ٢ ں^{٢}

فالقشرة الاولى (ونرمز لها بـ K) يمكن ان تحتوى على ٢ $\times$ ١^{٢} = ٢ الكترون ، وتحتوى القشرة الثانية (ونرمز لها بـ L) على ٢ $\times$ ٢^{٢} = ٨ الكترونات ، وتحتوى الثالثة (ونرمز لها بـ M) على ٢ $\times$ ٣^{٢} = ١٨ الكترونا ، وتحتوى الرابعة (ونرمز لها بـ N) على ٢ $\times$ ٤^{٢} = ٣٢ الكترونا ، وتحتوى الخامسة (ونرمز لها بـ O) على ٢ $\times$ ٥^{٢} = ٥٠ الكترونا وهكذا دواليك .

لنحفظ هذه الارقام ثم نرجع ثانية الى تركيب الذرات . فنرى بان اول من يتخذ مكانه فى تركيب الذرة هى القشرة K وهى اصغر القشرات وتحتل اقل حيز فى التركيب . وهى تمتلئ تماما فى ذرة الهيليوم . وفى الواقع ان هذه القشرة تؤلف طابقا واحدا لشقة واحدة تتسع لاثنين .

اما القشرة التالية فهى اكثر تعقيدا فى التركيب . وهى تشغل لا الطابق الثانى فحسب ، بل وثلاث شقق « واقعة بين الطوابق » ،

وكل منها تتسع لاثنين ايضا . ويتم امتلاؤها فى ذرة النيون (الطبعة الزرقاء رقم ١٠ ، او المربع العاشر فى جدول منديلييف) .

وبعد ذلك يجرى اسكان ١٨ ساكنا فى القشرة الثالثة . ويتم امتلاؤها حتى الارجون (رقم ١٨) بنفس الطريقة التى جرت فى القشرة السابقة . فيتم اولا اسكان الطابق الثالث نفسه ، ثم الشقق الفرعية الثلاث « بين الطوابق » . لكن يحدث خلل فى هذا الترتيب الصارم فى الذرة التالية للارجون وهى ذرة البوتاسيوم .

فيجب عندئذ املاء خمس شقق بين الطوابق ، لكن تخطيط هذه الشقق مختلف . وهى تختلف عن الشقق الثلاث الاولى فى كونها اكثر ضيقا وامتدادا . ونجد ان الساكن الجديد يرفض الانتقال الى مثل هذه الشقة غير المريحة ، ويطالب بظروف سكنية أفضل .

ويصر على اجابة مطالبه ، فيضطر المهندس المعمارى الى منحه شقة جيدة فى الطابق الرابع . ومن اجل ان لا يعانى مرارة الوحدة فيضاف اليه الكترون آخر فى الذرة التالية للبوتاسيوم وهى ذرة الكالسيوم .

ونجد هنا خير تطبيق لمبدأ أفضل توزيع للطاقة ! والمسألة بالطبع هى ليست فى الحاح الساكن — الالكترون واستجابة المهندس المعمارى — الطبيعة . بل المسألة هى ان اسكان الالكترون فى الطابق التالى قبل ان يمتلئ الطابق الذى قبله تماما يولد ذرة اكثر ثباتا من اسكانها « بموجب القانون » . وتكون طاقة الوضع لتنافر الالكترونات فى هذه الذرة أقل من غيرها .

لكن الطبيعة تعود بعد ذلك الى النظام القديم فى ملء الذرات بساكنيها . فيحشر « الساكنون الجدد » حشرا فى ٩ شقق ابتداء من السكانديوم (رقم ٢١) وحتى النحاس (رقم ٢٩) ، وهى نفس تلك الشقق الطويلة جدا والضيقة التى لا تتوفر فيها وسائل الراحة .

وهكذا نجد ان الذرات التى يقطن فيها ساكنيها هى « فوق » ، بينما تخلو الشقق « تحت » من ساكنوها ، وبفضل اختلال النظام المعتاد لدى اسكانها اكتسبت عددا كبيرا من الصفات غير الاعتيادية الجديدة . لذلك فقد سميت هذه الشقق بـ « الشاذة » . ونحن نشاهدها فى احيان كثيرة عند تجوالنا فى مرسم « المهندس المعمارى » الذرى .

واذا توخينا الدقة فى التعبير فنقول ان القشرة الثالثة يجب ان تمتلئ تماما عند النيكل (رقم ٢٨) . لكن بالنظر لان الطبيعة لم تقم باسكان قشرة كاملة تماما قبل ان تبدأ باسكان القشرة التالية ، فان القشرات قد اختلطت فيما بينها ، ولم تمتلئ القشرة الثالثة الا بعد بدء اسكان القشرة الرابعة اى عند الخارصين (رقم ٣٠) .

ولم يحدث اى تحسن فى الوضع بعد ذلك . فما ان يصل الامر الى الانتقال الى الشقق الضيقة والطويلة «ما بين الطوابق» حتى نجد الطبيعة تتراجع امام مطاليب الالكترونات ، فتقوم اول الامر باسكان زوج من الساكنين فى الطابق التالى اى فى القشرة التالية . وبعد ذلك فقط تقوم باسكان الشقق غير المريحة فى الطابق الاسفل منه ، كما لو كان ذلك يجرى تحت حمايتهم المكشوفة .

وتتكرر نفس المسألة ، التى جرت فى مجموعة السكانديوم الى النحاس ، فى مجموعة الذرات من الاوتريوم (رقم ٣٩) الى البلديوم (رقم ٤٦) ، ومن اللنثانوم (رقم ٥٧) الى اليتربيوم (رقم ٧٠) . اما بعد ذلك فحتى آخر الذرات التى اكتشفها كورتشاتوف (رقم ١٠٤) تكون ذات نقص فى السكان . فلا توجد فيها قشرة واحدة بدون سكان بل قشرتان وثلاث . وهى تنتظر سكانها دون جدوى اعتمادا على الاسباب التى سنشرحها فى الباب القادم .

ربما يبدو لنا بان الطبيعة تقوم باعمال الانشاء بصورة غير منسقة ، لكنها مفيدة بالنسبة للطاقة .

ومن ذلك نرى ان قانون الموجات الذى يحدد عدد السكان وطريقة اسكان الابنية الذرية ليس قويا من كل النواحى . اذ كثيرا ما يجرى تعديله بواسطة قانون لا يقل اهمية وقوة عنه وهو قانون ثبات التراكيب الذرية التى اوجدتها الطبيعة .

الذرات والكيمياء

بعد ان تنتهى جولتنا فى مرسم « المهندس المعمارى الذرى » نتوقف للمرة الاخيرة امام الجدول الدورى لمندلييف . ونحن نعرف هذا الجدول منذ ايام الدراسة فى المدرسة .

فنجد فى جانبه الايسر عمود الادوار ، وترد اسفله مجموعة من

الارقام عددها سبعة . فكم عدد العناصر المختلفة (اى التراكيب الذرية) فى كل من هذه الادوار ؟ نجد فى الاول — ٢ ، وفى الثانى — ٨ ، وفى الثالث — ٨ ايضا ، وفى الرابع والخامس — ١٨ لكل منها ، وفى السادس — ٣٢ (لا تنس حساب العناصر الارضية النادرة — لانتانيد (Lanthanides) — فى اسفل الجدول) وفى السابع — ١٦ (وسنشرح سبب ذلك كما قلنا فى الباب القادم) .

ولنعد الآن الى الارقام التى تميز سعة القشرات الالكترونية بحسب زيادتها : ٢ ، ٨ ، ١٨ ، ٣٢ والخ . ولنقارن هذه الارقام مع تلك الواردة اعلاه فنجدها واحدة . لكن لا يبدو مفهوما سبب كون بعض الارقام فى الجدول الدورى تتكرر مرتين : ٢ ، ٨ ، ٨ ، ١٨ ، ١٨ ، ٣٢ (سوف لا نبحث الدور الاخير الآن) .

ان هذه الارقام المتكررة هى نتيجة الاخلالات تلك فى نظام احلال (اسكان) الالكترونات فى الذرات ، التى تحدثنا عنها اعلاه . لذلك فان الدور الثالث لا ينتهى فى النيكل (رقم ٢٨) بل فى الارجون (رقم ١٨) . اما بعد ذلك فان هذا « الانتقال » — التزحزح — ، الذى تضاف اليه « الانتقالات » الاخرى الناجمة عن الاخلالات الاخرى فى نظام اسكان الذرات ، سوف يستمر حتى آخر الجدول الدورى .

ونتيجة لذلك لا نحصل على التناظر بين القشرات والادوار بمثل هذه السهولة . ومع ذلك فان « سعة » الدور لا يزيد فى اى مكان

على « سعة » القشرات المناظرة . وهكذا فان الصورة الكمية لاسكان الذرات توضح سمة هامة للنظام الدورى .

ولنتطلع الآن الى قمة الجدول . فنجد مكنونا هناك باحرف كبيرة كلمة « مجموعات » ونرى تحتها الارقام الرومانية من I الى VIII ، والى اقصى اليمين نجد — 0 . فماذا تعنى هذه الارقام ؟ ان اى تلميذ سيجيب على هذا السؤال قائلا : « انها تمثل تكافؤ العناصر ! »

ولنكن حازمين معه ، فنصحح كلامه . اولا انها ليست مجرد قيم التكافؤ ، بل التكافؤ بالنسبة للفلور (واحيانا يقال بالنسبة للايدروجين) . وثانيا ما هو التكافؤ ؟

فيجيب التلميذ بسرعة ان التكافؤ هو عدد الذرات التى يمكن ان تتحد .... الخ . لكن لا نجد مثل هذا المفهوم للمسألة ، الا فى كتب الكيمياء الوصفية « « نضع كذا فى اناء ، ثم نسخنه ، ونراقب العملية ، ثم نسكب عليه مفاعلا ، فيتكون راسب ... ») .

ان الكيمياء النظرية قد وضعت منذ زمن طويل على اساس فيزيائى .

ان التكافؤ ، وبتعبير ادق التكافؤ بالنسبة للفلور — هو عدد الالكترونات فى القشرة الخارجية البعيدة عن النواة . وينطبق التكافؤ اعتمادا على هذا التعريف على رقم المجموعة فى كل مكان ، باستثناء العمودين الاخيرين فى الجدول الدورى . وكان من الاصح

وضع الرقم VIII فوق آخر عمود ، ووضع الارقام صفر وواحد واثنين فوق العمود ما قبل الاخير . ويوجد لذلك ، كما سنرى ، اساس ثابت .

ولكن لماذا لا يوجد فى القشرة الخارجية للذرة أبدا اكثر من ثمانية الكترونات ؟ ويمكن فهم ذلك ببساطة بان نعيد الى ذاكرتنا نظام توزيع « مساحة السكن » فى الذرات . فهناك فى القشرة الاولى الكترونان ، وفى الثانية ٨ الكترونات ، ويجب ان يكون فى القشرة الثالثة ١٨ الكترونا، لكن احلالها فى الذرة يتوقف مؤقتا لدى الارجون حيث يكون فيها ٨ الكترونات . وبعد ذلك اصبحت القشرة الخارجية القشرة الرابعة ، وتحولت الثالثة الى القشرة الداخلية ، واستقرت تحتها . وحدث نفس الشيء بدوره مع القشرة الرابعة وهكذا .

وحالما يصل عدد الالكترونات فى القشرة الخارجية الى ثمانية تصبح اضافة عدد آخر منها الى القشرة غير نافع . ولكن تظهر بعد ذلك قشرة جديدة ، اما القشرة التى لم يتم بناؤها فتنتقل الى اعماق النواة . ولا يهمنا الآن فيما اذا سيكتمل احلال الالكترونات فيها ام لا : لان الصفات الكيمياوية للذرة تتحدد من قبل القشرة الخارجية فقط .

وهكذا يصبح من المستحيل تواجد ثمانية انواع من السلوك الكيمياوى للذرات بحسب عدد الالكترونات الموجودة فى قشرتها الخارجية . وينبغى الاشارة قبل الاستطراد فى الحديث الى ان القشرة

ذات الثمانية الالكترونات التى اسكنت بصورة كلية هى ذات طاقة وضع تقل كثيرا عن « الشقق » الخالية او شبه الخالية فيها . وبما ان الامر كذلك ، فهذا يعنى ان الذرة التى تمتلك مثل هذه القشرة تكون ثابتة الى درجة عالية ، بما فى ذلك من الناحية الكيمياوية .

ان الذرات التى لها قشرات خارجية ذات عدد كامل من الالكترونات تكون « نبيلة » الى حدّ انها تترفع عن اقامة اية علاقات مع المرتبة « العادية » من الذرات . وقد سميت عناصرها المناظرة باسم العناصر « النبيلة » او الخاملة . ونجدها مجتمعة سوية فى العمود الاخير من جدول مندلييف .

وتتحرك الذرات « الارستقراطية » هذه وسط « عامة » الذرات التى تحاول تقليدها فى كل شيء قدر المستطاع . وتحاول جميع الذرات « غير النبيلة » بمختلف السبل تكوين قشرات خارجية ذات ثمانية الكترونات فيها .

غير انها لا تستطيع القيام بذلك بنفسها ، لذلك فانها تبحث دائما عن شركاء . على انه اذا كان لدى احد من الناس قفطان ارستقراطى ، ولدى آخر سراويل جميلة ، فان ذلك لا يكفى لجعل الاثنين حسنى المظهر ... فهذه الملابس تكفى لواحد منهما فقط .

وعندئذ يحدث ما يطلق عليه الكيميائيون اسم التفاعل ، بينما نطلق عليها اصطلاحا اسم « التضحية بالنفس » : فيقدم احدهم للآخر سراويل بينما يسير هو وراءه كما لو كان تابعا له . لكن

الاخير لا يبدو عاريا تماما ، فانه اذ يلقى عنه الملابس الزائدة يكشف عن رداءه الارستقراطى الحقيقى (ولو ان ذلك يتعلق فى الحقيقة بالذرات التى تأتى بعد النيون) .

وفى الواقع لنبحث على سبيل المثال التفاعل الجارى بين الصوديوم والكلور ، الذى يؤدى ، كما هو معروف ، الى تكوين جزيئة ملح الطعام NaCl . فلدى ذرة الصوديوم « سراويل » : ويتمثل فى الالكترون الوحيد الموجود على القشرة الثالثة الخارجية لها . بينما تمتلك ذرة الكلور « قفطانا » : فلديها على نفس القشرة سبعة الكترونات . ويضحى الصوديوم عن رضى بالالكترون الوحيد له ويقدمه الى الكلور . فيكتسب الاخير القشرة « النبيلة » ذات الالكترونات الثمانية .

كما ان الصوديوم يربح شيئا جديدا ايضا . فهو اذ يرمى « سراويله » يتعرى ... فتظهر مجموعة كاملة من ثمانية الكترونات لغاز النيون النبيل ! وهكذا تسنح الفرصة لاثنين « من العامة » ان يصبحا سوية وفى آن واحد « من الارستقراطيين » . لكنهما يختلفان عن الارستقراطيين الحقيقيين فى كونهما يرتبطان لوحدهما فقط بروابط وثيقة مكونين جزيئا واحدا .

وهكذا فان الذرات تنقسم الى « معطية » و « آخذة » . وتكون الذرات التى تحتوى فى قشرتها الخارجية على أقل من اربعة الكترونات ذات ميل اكبر لاعطائها . اما الذرات التى يكون فيها هذا العدد اكبر من

اربعة فانها تميل الى اخذها . وفى الواقع ان من الاسهل اكتساب الكترونين مثلا ، من اعطاء ستة (يبرز مثل هذا الوضع فى ذرة الاوكسجين) .

ويوجد فى المجموعة رقم IV عدد من « الكسالى العاطلين » . ولدى كل منهم اربعة الكترونات فى القشرة الخارجية وهم يترددون طويلا بين « الاخذ » و « العطاء » . وقد سميت هذه العناصر بالامفوتيرية (amphoteric) ، وهذا يعنى بلغة الكيمياء على وجه التقريب « لا ابيض ولا أسود » . ويمكن ان ينتظر المرء من مثل هذه العناصر أى سلوك كيمياوى .

وتوجد فى المجموعة رقم VIII ذرات « مخبولة » . وهى تتواجد هناك دون وجه حق، كما يقال عموما . ويوجد فى قشرتها الخارجية الكترون او اثنان لا اكثر . غير ان القشرات الموجودة تحتها تؤثر وبصورة معقدة على سلوك الالكترونات فى القشرة الخارجية .

وفى النتيجة تصبح الذرات « المخبولة » قادرة على القيام باغرب الاشياء التى لا يمكن التنبؤ بها . فمثلا يكون لها كقاعدة تكافؤ متغير : فهو بقدر معين فى تفاعل ما ، وبقدر آخر تماما فى تفاعل آخر . ان مجرد وضعها تحت الرقم VIII لا يعنى سوى ان اعلى تكافؤ لها بالنسبة للاوكسجين يمكن ان يساوى ٨ ، وبكلمة أخرى ان كل ذرة من هذا النوع يمكن ان تتحد مع اربع ذرات للاوكسجين .

وينبغى ان لا تظن بان الذرات « المخبولة » الاخرى ، التى

تكمن فى الاقسام الاخرى للجدول الدورى تسلك سلوكا اكثر تعقلا . كلا ، مطلقا ! فهى قادرة على القيام بنفس التصرفات الغريبة التى تقوم بها أخواتها من المجموعة VIII .

ويغفل جدول منديلييف هذه الناحية . على انه لا يجوز مطالبته بذكرها . فقد وضع الجدول فى عصر لم يعرف فيه أحد حتى كيفية تركيب الذرة . ولا يسرع العلماء اليوم فى اجراء تعديل عليه . ففى سلوك العناصر الشاذة الكثير من الجوانب الغامضة . وعند كشفها سيتضح كل شيء ...

مولد الطيف الضوئى

والآن بعد ان رأينا الذرة « بشكلها الجديد » لميكانيكا الكم ، ينبغى التعرف على اشعاعها . انتم تتذكرون كما يبدو ان نظرية بوهر لم تستطع فى تفسيرها لمنشأ اطياف الذرات ان تصف بشكل صحيح قوانين تكون الطيف . واضطرت ميكانيكا الكم الى اجراء التعديلات الضرورية فى الصورة التى رسمها بوهر لذلك .

ان ميكانيكا الكم تتفق من حيث المبدأ مع نظرية بوهر فى شرح منشأ الاطياف الضوئية . فاثناء قيام الالكترونات الذرية بقفزاتها من حالة بطاقة معينة الى حالة بطاقة أخرى فان الفرق بين هاتين الطاقتين يتمثل بشكل كم الطاقة الكهروضوئية اى الفوتون . ولكن اجرى على هذا التفسير بعض التعديل فيما بعد .

فمن اين والى اين يقفز الالكترون ؟ وما دامت توجد المدارات في النظرية فان تصور ذلك من الامور السهلة . فيتحرك الالكترون في مدار ، كما لو كان يتحرك فوق سكة ، ثم يقفز فجأة الى طريق آخر . فاذا نقصت طاقته اثناء هذه القفزة يتكون الفوتون . واذا ما ازدادت طاقته في الطريق الجديد ، فمعنى ذلك ان الفوتون قد امتّص قبل حدوث القفزة .

غير ان ميكانيكا الكم رفضت المدارات وابدلتها بالسحب الالكترونية . كما تفقد صورتها ايضا عملية انتقال الالكترونات . ويجب الآن فهم ذلك باعتباره تغيرا لحظيا (مفاجئا) في شكل وموضع السحابة الالكترونية في الذرة . ان الاشعاع او ابتلاع الفوتون يحدث هزّة في « الكتلة الهادئة » للذرة ، وتتخذ شكلا جديدا تماما .

لقد رفضت ميكانيكا الكم تصوير القفزات الالكترونية وادخلت مفهوما جديدا هو الاحتمال . ففي نظرية بوهر يمكن حدوث قفزات الالكترون من مدار الى آخر دائما ، ولا يتوقف احتمال حدوث ذلك على نوعية هذه المدارات . وفي هذا بالذات يكمن سبب فشلها .

وتبين ميكانيكا الكم ان هذا الاستنتاج غير صحيح . فلقفزات الالكترونات احتمال يتوقف الى حد كبير على شكل السحب الالكترونية التي تتجاوب مع الالكترون قبل وبعد القفزة . وعندئذ فان احتمال القفزة ـ بشكل تقريبي ـ كلما كان اكبر كلما اصبح قفز هذه السحب اكثر قوة وازداد اختراقها المتبادل بين بعضها البعض :

واذا ما اردنا تصوير هذه العملية فان الالكترون يستطيع القفز الى حالة جديدة كالمسافر الذى يقفز من قطار الى آخر اقترب منه للحظة من الزمن . ومن المفهوم انه لا يكفى ان نكسب المسافر الطاقة اللازمة للقفز . فيجب ان يكون القطاران قريبين من بعضهما البعض . ونشير فى اتمام هذا التشابه الى انه كلما ازداد طول القطارين كلما ازداد « مجال الفضاء » الذى يكونا فيه قريبين من بعضهما البعض ، وبذلك يسهل على المسافر القفز من قطار الى آخر .

ان ما يحدث فى الذرة يشبه ذلك تماما . فالقطارات هنا تتمثل بشكل سحب الكترونية . ونحن نعرف بان هذا الشكل يمكن ان يكون كرويا او بشكل سيجار وغير ذلك .

وتخضع دراسة شكل السحب الالكترونية الى علاقات بسيطة (بقدر ما تتحمل ذلك معانى الكلمات طبعا) . فمن الناحية العملية لا تنفذ السحب الكروية ذات المركز المشترك (نواة الذرة) تقريبا الى داخل بعضها البعض . ويمكن القول دون وجل بانها قد لا تتماس ابدا . وهذا يعنى بان القفزة الالكترونية لا يمكن ان تتحقق بين الحالتين المتجاوبتين . والآن اذا ما وضعنا سيجارا فى كرة فانهما يتداخلان مع بعضهما البعض كلما كان السيجار أثخن واقصر . ويمكن ان يتداخل سيجاران مع بعضهما البعض ايضا . لكن الامر هنا اكثر تعقيدا . ومن الواضح فقط ان السيجاران الثخين القصير

والرفيع الطويل يتداخلان فى بعضهما البعض بقوة أشد من الكرة والسيجار الرفيع .

وعلى هذا الاساس فسنحصل على احتمالات قفزات الالكترونات من سحابة كروية الى اخرى بشكل سيجار او بين سحابتين بشكل سيجار . ان القوانين التى تقسم القفزات الالكترونية فى الذرات الى اكثر احتمالا واقل احتمالا – تسمى فى ميكانيكا الكم بقواعد الانتخاب (selection rules) .

وقد كونت ميكانيكا الكم هذه القواعد بشكل صارم ومحدد جدا فسمحت بقفزات معينة وحرّمت اخرى ، اقل احتمالا . لكن الطبيعة لم تخضع لهذا التحريم .

ويلتزم بقواعد الانتخاب جيدا ، وبهذا القدر او ذاك ، فى الذرات الخفيفة فقط ، التى لا يزال عدد الالكترونات فيها قليلا ، لذا فان سحبها تتداخل مع بعضها البعض بصورة نادرة جدا . اما فى الذرات الثقيلة التى تحتوى على الكترونات كثيرة ، وحيث تتولد سحابات مشوشة ومتشابكة اى « خليط » حقيقى من السحب ، فان تحريمات ميكانيكا الكم تفقد مغزاها الى حد كبير .

وفى غمرة قفزات الالكترونات هذه وفى الهزات المتغيرة الغريبة والسريعة للسحب الالكترونية تتولد الفوتونات . فهى عندما تطير الى جهاز الطيف الضوئى وتمر فيه بعملية « الفرز » فانها تولد خطوطا طيفية من جميع الوان قوس قزح . وكلما ازداد تكون عدد الفوتونات

من الذرات فى الثانية اصبحت الخطوط المتجاوبة معها اكثر سطوعا .

واذا ما كان عدد الذرات غير متغير فان سطوع خطوط الطيف يمكن ان يتوقف على شيء واحد هو تردد قفزات الالكترونات فى الذرات . ويتحدد هذا التردد كما عرفنا باحتمال حدوث القفزات . وهناك سحب مختلفة واحتمالات مختلفة ـ بعضها كبيرة ، اما الاخرى فضئيلة جدا .

ولكل طاقة للفوتون ، ولكل خط للطيف الضوئى احتماله ودرجة سطوعه . وهكذا يتولد الطيف الضوئى للذرة المؤلف من عدد من الخطوط ذات درجة سطوع مختلفة .

ومع ذلك فانه من الاسهل الحديث عن كل ذلك من حساب تداخل سحب الالكترونات فى بعضها البعض . وقد حققت ميكانيكا الكم هذه المهمة بشكل رائع ، وحصلت على خير اتفاق مع الطيف الذى تجرى مراقبته . ان علم الظواهر الطيفية يقوم الآن على اسس متينة.

الخطوط العريضة والخطوط المزدوجة

وبدا ان الباحثين فى علم الظواهر الطيفية سيكونون راضين تماما عن هذه النتيجة . لكن الامر ليس كذلك . ولقد تطور تكنيك التحليل الطيفى بسرعة ، واصبحت اجهزته اكثر قوة وحساسية .

وعندئذ قدم هؤلاء الى الفيزيائيين النظريين مسألتين « عويصتين » جديدتين .

هل ان الفوتون يناظر خط تردد واحد وطول موجة واحد؟ نعم . فلماذا اذن لا تكون الخطوط الناتجة فى اللوح الفوتوغرافى للجهاز الطيفى ضيقة الى ما لا نهاية ، ويكون لها عرض كبير نوعا ما ؟

ربما كان الفيزيائيون سيجهدون قرائحهم عشرات السنين فى بحث هذه المسألة الساذجة قبل ظهور ميكانيكا الكم . اما الآن فلم تتطلب منهم اكثر من بعض التفكير .

وقد ظهر ان السبب فى ذلك يعود الى الخصائص الموجية للالكترون ذات السمة الثابتة لها ، التى هى علاقات الريبة .

قلنا بان الالكترون فى الذرة يمتلك طاقة محددة . فما دخل الريبة فى الموضوع ؟ واذا ما تحددت الطاقة الاولية ، فان الطاقة النهائية محددة ايضا ، وهذا يعنى بان الفرق بينهما الذى يناظر طاقة الفوتون يجب ان يكون مقدارا دقيقا بصورة مطلقة !

ومع ذلك فهناك شيء من الحيلة فى هذه المسألة . فان المستويات الدقيقة للطاقة تطابق ، كما بينا ، الاوضاع المستقرة للالكترونات ، اى الاوضاع التى لا تتغير « الى الابد » . فما هى قفزات الالكترون ، ان لم تكن اخلالا بالاستقرار ؟ فقد كان الالكترون فى وضع ما ، ثم قفز الى وضع آخر – اى انه لا وجود هناك لوضع « أبدى » . وحالما تبرز هذه القضية تعمل علاقة هيزنبرج عملها .

فما هو الزمن الذى يمضيه الالكترون فى الذرة وهو فى حالة

السكون ، الى ان تحدث القفزة التالية ؟ ان ذلك يختلف باختلاف الاحوال . ولنرمز الى الزمن هذا بالرمز $\Delta\upsilon$. وعندئذ نستخلص فورا من المقارنة الواردة فى ص ١٥٧ مقدار الريبة فى طاقة الفوتون :

$$\Delta \text{ف} \sim \frac{h}{\Delta\upsilon}$$

ويمكن الانتقال منها بسهولة بموجب معادلة بلانك لكمات الطاقة الى معرفة الريبة فى تردد الفوتون . وهى ترتبط بكل بساطة بزمن « الحياة المستقرة » للالكترون فى الذرة :

$$\Delta\omega \sim \frac{\text{١}}{\Delta\upsilon}$$

وبتعبير آخر كلما كانت فترة « استقرار » حياة الالكترون فى الذرة اكبر ، كلما كانت خطوط الطيف الضوئى التى تناظر انتقاله من حالة الى اخرى او بالعكس أضيق . ولهذا السبب بالذات تكون خطوط الطيف الضوئى عند درجات الحرارة والضغط العالية ، وعندما يحيا كثير من الالكترونات فى الذرات حياة منتقلة ، عريضة جدا ومنتشرة بشدة .

اما المسألة « العويصة » الثانية فسببها هو ان الكثير من خطوط الطيف الضوئى ، التى يبدو انها تتجاوب مع أحد اطوال الموجة ، هى فى حقيقة الامر مؤلفة من عدد من الخطوط القريبة

من بعضها البعض. ولم يتسن العثور على هذا التركيب «الدقيق» لخطوط الطيف الضوئى الا فى القرن الحالى بفضل النجاحات التى بلغها تكنيك دراسة الظواهر الطيفية .

وقد ظهر انه عند حدوث القفزات الالكترونية بين نفس الحالات فيمكن ان تتولد فوتونات ذات طاقات مختلفة ولو الى حدٍّ ضئيل ! ونرى من ذلك ان الفيزيائيين كانوا قد تبجحوا فحسب فى القول بانهم يستطيعون تحديد طاقات الالكترونات فى الذرات .

وقد أنكر الفيزيائيون جميع هذه الشكوك . لكنهم اضطروا « لابتداع » ... اللف . نعم لقد اكتشف اللف بفضل هذه الخطوط « الدقيقة » فى الاطياف فقط !

ان الحالة العامة لالكترونين ذوى لفين مختلفين فى الاتجاه ، والتى تحدثنا عنها لدى زيارتنا لمرسم « المهندس المعمارى الذرى » ، تبدو لدى نشوء الاطياف « غير عامة » قليلا . ونحن لا نستطيع الحديث هنا عن العلاقة المعقدة المتبادلة بين كمية التحرك الزاوى الاعتيادية ولف الالكترون . لكننا سنورد بعض المعلومات عنها ادناه .

وسنشير الآن فقط بان هذه العلاقة بالذات هى التى تؤدى الى كون طاقة الالكترونات تختلف بنسبة ضئيلة بمختلف اتجاهات اللف . وهى التى تولد ازدواج خطوط الطيف الضوئى : فبدلا من خط واحد يظهر زوج من الخطوط التوائم لها نفس درجة السطوع .

والحقيقة ان هذه « التوائم » لا تظهر عادة الا فى تلك الحالات

عندما يتواجد فى القشرة الالكترونية الخارجية الكترون وحيد ومنفرد . واذا ما ازداد عدد الالكترونات فى هذه القشرة فقد تتولد « توائم ثلاثية » و« توائم رباعية» ، وحتى عدد كبير من « الابناء » لخطوط الطيف السابقة . وهذه ظاهرة شائعة فى عالم الذرات ، ولا نجد لها مثيلا فى عالم المخلوقات البشرية .

هذا ما اجابت به ميكانيكا الكمّ بشرف على السؤالين « العويصين » للباحثين فى علم الظواهر الطيفية .

وبذلك نختتم حديثنا حول الذرات . أما الآن فسنواصل الحديث عن حياة « العائلات » الذرية ــ الجزيئات. وحتى عن حياة « جيوش » ذرية كاملة ــ اى البلورات .

« زواج » الذرات

ليتذكر القارىء كيف ان الذرات « العادية » حاولت تقليد الذرات « الارستقراطية » للعناصر الخاملة . وكيف انها ارتدت الملابس الثمينة مناصفة . وانه يحدث احيانا ان يشترك ثلاثة او اربعة وحتى اكثر من هذا العدد من الشركاء فى الملابس احيانا .

وقد تمر هذه الحيلة على الناظر عن بعد . وقد يحدث ان يمر جزىء كامل وسط مجموعة من الذرات دون اثارة اى تشويش كما لو كان ذرة لاحد العناصر الخاملة . الا ان هذه الحيلة لا تنطوى على الناظر من قرب .

اذ تعيش فى الجزيئات بدلا من الذرات « مخلوقات » — جسيمات — كثيرة الملابس او عارية ، وتسمى بالايونات الموجبة والسالبة . وقد لا تمر عملية تبديل « الملابس » بين الالكترونات بالنسبة لها دون اعتراض . فالذرة التى تحصل على ملابس الكترون شريكة لها ، تتمسك بها ولا تدعها تفلت من بين يديها . كما ان الشريكة التى نزعت عنها ملابسها لا تود ، بدورها ، الافتراق عنها دون رجعة . وهكذا تبقيان فى وضع التلاصق او التماسك الذى يطلق عليه علميا اسم الجزىء الايونى (ionic molecule) .

ان قوى التلاصق فى هذه الجزيئات هى بشكل اساسى قوى الجذب الكهربائى الاعتيادى بين ايونين مختلفين فى الشحنة الكهربائية . وهذا شىء لا علاقة له بميكانيكا الكم بعد .

وتوجد انواع كثيرة من الجزيئات الايونية . و « تتزاوج » فيها الذرات ، ولابد ان تكون احداها فى الجانب الايسر من الجدول الدورى لمندلييف ، بينما الاخرى فى الجانب الايمن منه . وكلما تكونان بعيدتين الواحدة عن الاخرى فى الجدول فان رابطتهما « العائلية » تكون اشد قوة وثباتا . وبالعكس فان « تزاوج » الذرات من المجموعات المتقاربة فى الجدول يكون أضعف وتكون رابطتها « العائلية » غير ثابتة جدا .

ولكن يوجد عدد غير قليل من الجزيئات تتزاوج الذرات فيها انطلاقا من اعتبارات مختلفة تماما . وابسط « عائلة » من هذا

النوع هى جزىء الهيدروجين . وتنتمى الى هذه الطبقة من الجزيئات جميع الجزيئات ذات « العنصر المفرد » (مثل جزيئات الاوكسجين والنتروجين والكلور) وكذلك الجزيئات التى تكون ذراتها اما فى الجانب الايسر او الايمن من جدول منديلييف . وقد سميت هذه الجزيئات بالاسهامية (covalent) .

وقد وجدت ميكانيكا الكمّ لتفسير سبب وجودها . وفى الواقع ، تصور بان احدى ذرات الهيدروجين اقتربت من ذرة مماثلة أخرى . وحتى الآن تعيش كلتا هما بدون « عائلة » ، وتحسد كلتا هما ــ كالعزاب ــ اولئك المرتبطين برابطة عائلية . فتقول الذرة الاولى لزميلتها :

ــ اعطنى دولاب ملابسك ، فنتحد فى جزىء واحد .

فتجيب الثانية :

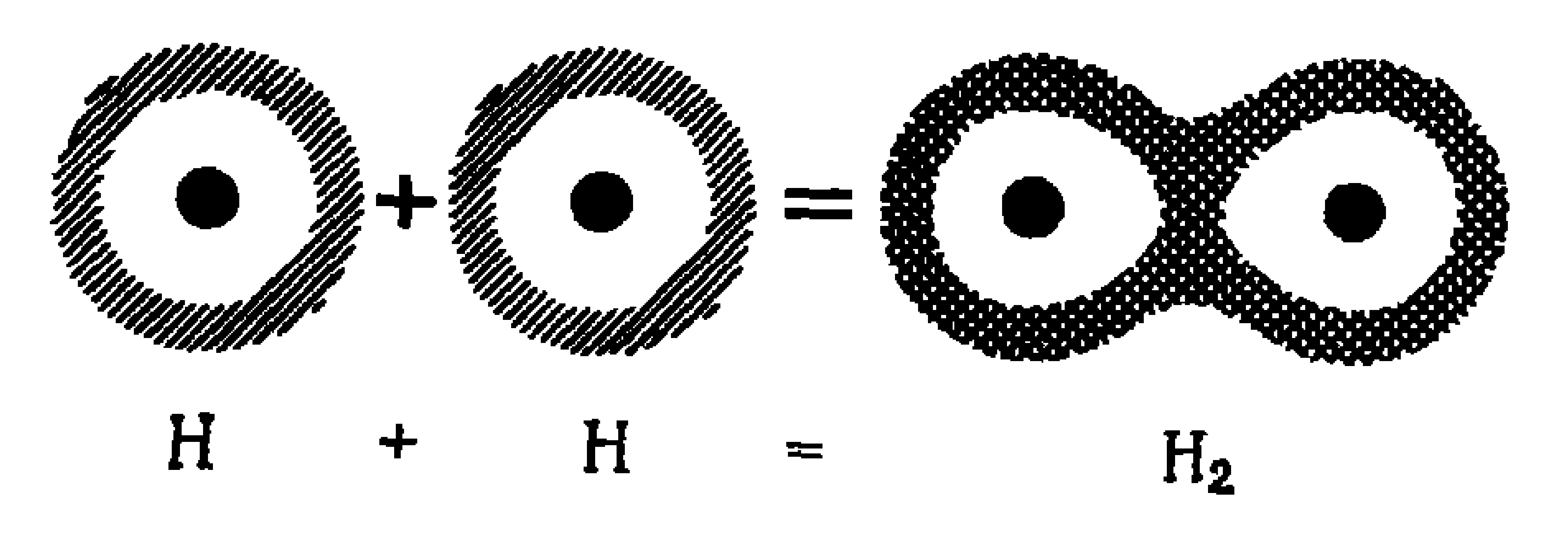
ــ لى الحق ايضا بان اطلب منك نفس الشىء .

ــ اذن ، ربما الافضل ان نتبادل الملابس ؟

ــ ولكن ما الفائدة من ذلك ؟ فسوف لن يتغير اى شىء بعد ذلك : اذ ان ملابسنا متشابهة تماما .

ويحضر هذا الحديث ، طبعا ، « المهندس المعمارى الذرى » . لكنه يستعد الآن لا لبناء الذرات بل الجزيئات . فيقدم نصيحته لكلا الطرفين المتكبرين قائلا :

ــ ومع ذلك فلتوحدا دولابى ملابسكما. فبالرغم من كل شىء



شكل ١١

لن تستطيعا عمل بدلة « ارستقراطية » ثمانية الالكترونات منهما — لان كمية القماش غير كافية . فليقطن احد الالكترونات قليلا فى احدى الذرتين ، ثم فى الذرة الاخرى ، وليتنازل الآخر كذلك .

فتتساءل الذرتان :

— وماذا سيتغير من الامر ؟ لقد اقترحنا الواحدة على الاخرى تبادل الالكترونات من قبل .

— انكما تخطئان . فانتما لم تأخذا بنظر الاعتبار ، بانه ستكون هناك لحظات يكون فيها الكترون فى احدى الذرتين ، والكترون واحد فى الذرة الاخرى. وعندئذ ستظهران كايونين مختلفين فى الشحنة . بينما فى الجزىء الايونى ستتخلى احدى الذرتين عن الالكترونات بينما تكتسب الاخرى الالكترونات بحيث تكون الذرات متأينة طيلة الوقت تقريبا ، بينما سيتم لديكما تبادل الالكترونات فقط . فتتشبع احداكما بالالكترونات ، بينما تخلو الثانية منها ، والعكس بالعكس .

وتتساءل الذرتان وقد بدأتا بالاقتناع :
—وكم مرة يجب علينا تبادل الالكترونات ؟
فيقول المهندس المعماري الذري :
— مرات كثيرة . واذا ما تحدثت باللغة نصف الكلاسيكية ، لنظرية بوهر ، فانه بعد كل دورة تقريبا يجب ان ينتقل الالكترون في المدار من احدى الذرتين الى الاخرى ، بحيث ان مداره يشبه الرقم 8 .
فقالت الذرتان :
— حسنا ، فلنجرب .
وكانت النتيجة ان كونا عائلة متينة حقا . ولم يكن ليدرك لعبة الطبيعة الذكية هذه سوى ميكانيكا الكم ، ناهيك عن الحدس بنتيجتها . وقد اطلقت بحق على التأثير المتبادل بين الذرات الذي يؤدي الى تكوين الجزيئات ، تسمية التبادل . ولم تكن الفيزياء الكلاسيكية بقادرة على التفكير بهذا التأثير المتبادل .
فكيف يجري هذا التبادل الالكتروني بموجب تصورات ميكانيكا الكم ؟ ما دامت الذرات بعيدة عن بعضها البعض فان سحب الكتروناتها تتقاطع من الناحية العملية مع بعضها البعض . ولكن ما ان تتقارب هذه الذرات بصورة كافية حتى يبرز بفضل الاختراق الكبير المتبادل بين السحب الالكترونية احتمال ملحوظ بانتقال الكترون كل ذرة من الذرات القريبة من النواة الى الذرة المجاورة، اي وجود احتمال التبادل .

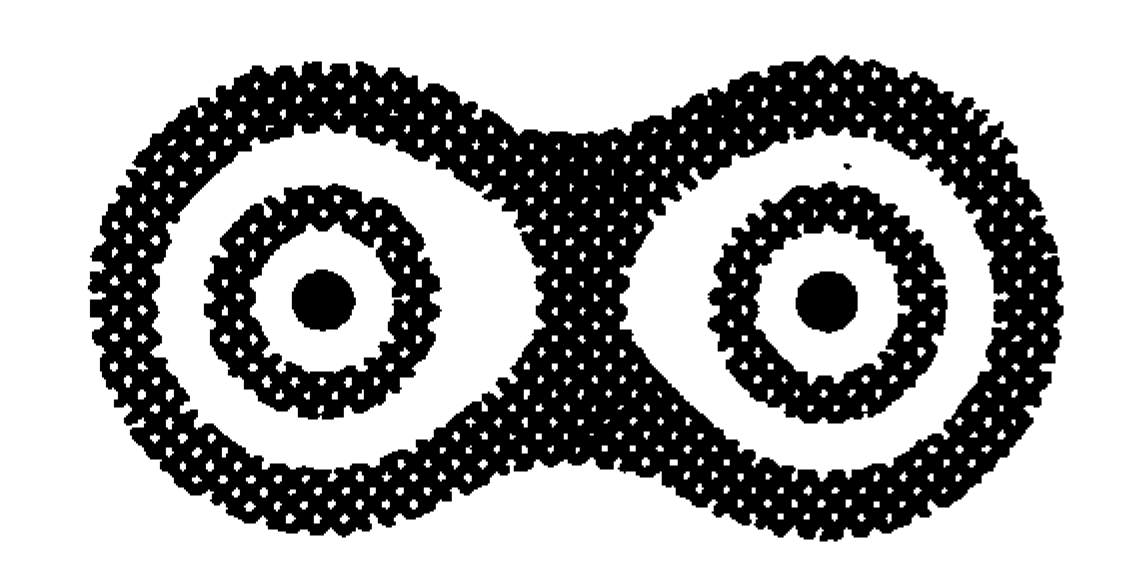
فما هي نسبة هذا الاحتمال ؟ انها تساوى في جزىء الهيدروجين حوالى ١٥ بالمئة . وبتعبير آخر، فانه في كل ساعة يجتمع كلا الكتروني الهيدروجين لمدة ١٠ دقائق في ذرة واحدة ، ولا يتبقى في الذرة الاخرى اى شيء منهما .

فهل يكفي ذلك لضمان ترابط متين للذرات في الجزىء ؟ لقد اظهرت حسابات العالمين الانجليزيين هايتلر (Heitler) ولندن (London) بمساعدة ميكانيكا الكم بانه كاف تماما ! وفي الحقيقة ان النظرية تنطبق في هذه المسألة بشكل جيد جدا على التجربة .

وقد ظهر بان اتحاد ملابس الالكترونات في الذرات « الفقيرة » او بالعكس « الغنية جدا » بواسطة التبادل هو أمر شائع جدا في عالم الجزيئات .

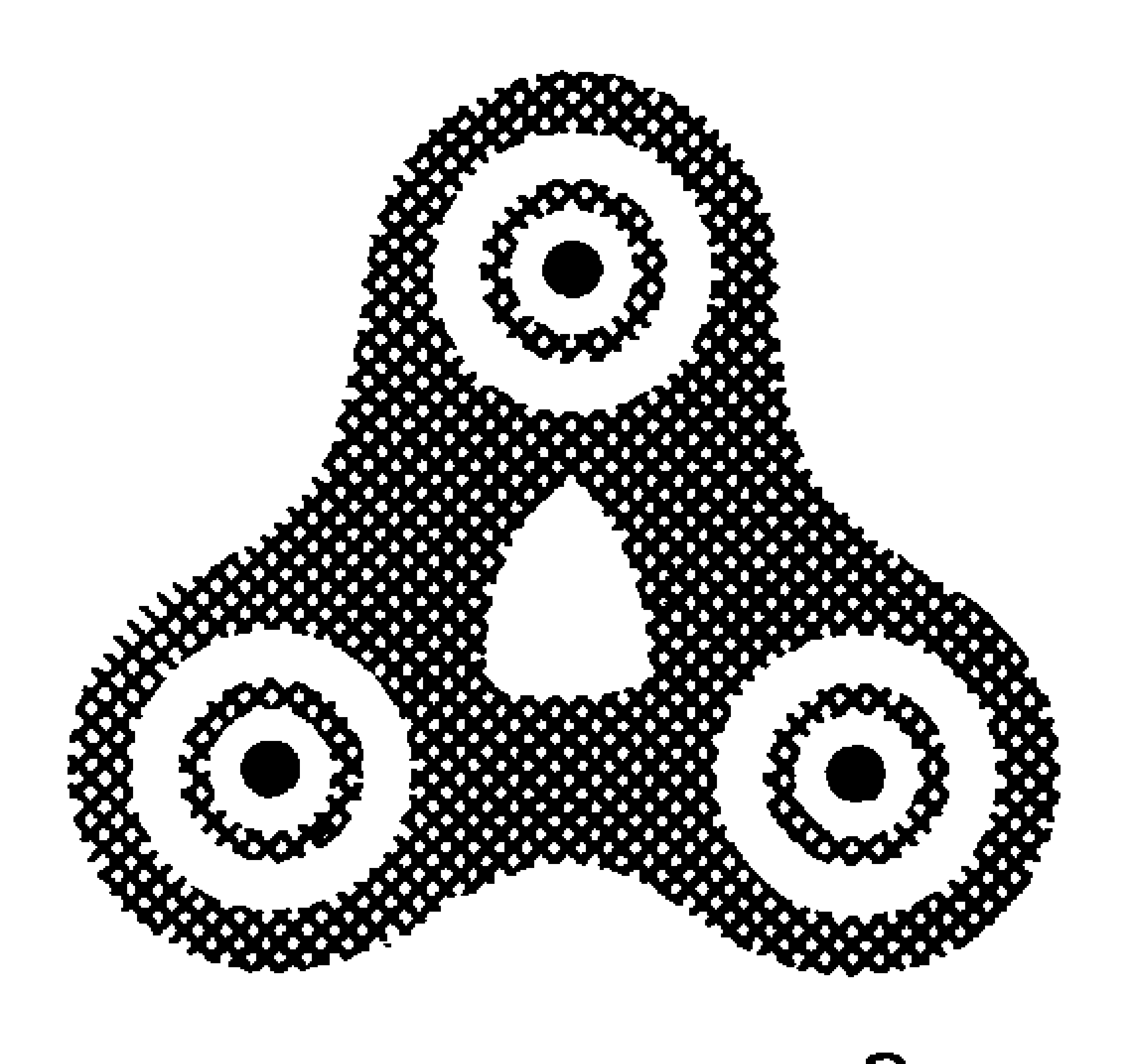
فمثلا توجد في ذرة النتروجين (« الطبعة الزرقاء » رقم ٧) سبعة الكترونات فقط . اثنان منها في القشرة الداخلية لا تشتركان في عملية التبادل . ومن ثم تتحدان في خمسة الكترونات في القشرتين الخارجيتين للذرات « المتزاوجة » .

وتتبع النتروجين ذرة الاوكسجين وتحتوى على ستة الكترونات لاغراض التبادل . فتكون جزيئا عاديا من الاوكسجين ثنائى الذرات . ويتحد في الاوكسجين الثلاثي الذرات ــ الاوزون ــ ١٨ الكترونا . ولتسهيل هذا التبادل ترتبط الذرة الثالثة بالذرتين الاوليتين لا في



O_2

شكل ١٢



O_3

شكل ١٣

خط مستقيم بل بشكل مثلث او زاوية مما يختصر طريق سير الالكترونات . وتنتشر الالكترونات حول هذه الذرات كلاعبى كرة الطائرة حول الكرة .

ولا يشبه التركيب الجزيئى هذا من حيث البناء الذرات المكونة له . كما يختلف ايضا توزيع الساكنين ، وشكل الشقق نفسها ايضا . لذلك فان صفات الجزيئات تختلف كليا عن صفات الذرات المكونة لها .

الاجسام الصلبة هى صلبة حقا !

وينقلنا مفترق الطرق الى منظر جديد مألوف بالنسبة لنا : فان كل ما يحيط بنا من اشياء تقريبا يتألف من اجسام صلبة . لكنها بالرغم من منظرها الخارجى المألوف مليئة بالاسرار الغامضة ، التى لم يستطع العلم تفسيرها الى يومنا هذا .

وقد جمعت الفيزياء حتى بداية القرن العشرين مادة كبيرة حول صفات الاجسام الصلبة . ونحن نعرف بان الاجسام الصلبة تكون بلورية او غير بلورية ، وانها تختلف فى توصيلها للحرارة والكهرباء ، وفى درجة نفاذ الضوء والصوت . لكن الفيزياء عاجزة عن اعطاء تفسير مقنع ولو لصفة واحدة من صفات الاجسام الصلبة هذه .

وهو أمر هام جدا . لان تقدم التكنولوجيا السريع يتطلب استخدام مواد طبيعية جديدة . وان متطلبات التكنولوجيا كثيرة الى حد انها اضطرت لاستخدام المواد الاصطناعية ، وبالاخص ذات الصفات الجيدة – كالصلادة الكبيرة وجودة موصليتها للكهرباء ، ومقاومتها للحرارة وغيرها من الصفات الكثيرة الاخرى .

فكيف يتم الحصول عليها ؟ هل بجمع كافة المواد واساليب تشغيلها المعروفة ؟ ... كلا ، انه ضرب من اعمال الكيمياء الخرافية والشعوذة . ان العلم الحديث يجب ان يسلك طريقا آخر .

وهنا تتدخل ميكانيكا الكم فى الامر من جديد . فتحاول مرة اخرى تحقيق نجاحات حاسمة خلال سنوات معدودة . فتبدأ من محاولات ادراك تركيب البلورات ، وبالدرجة الاولى بلورات الفلزات .

وفى الواقع ان البداية من البلورات شيء اكثر سهولة . فالبلورة هى توضع الذرات فى الفراغ بشكل منتظم ودورى ، وتشبه التركيب

الشبكى . لكن البلورة تختلف عن الشبكة الاعتيادية فى ان لها ثلاثة ابعاد بدلا من بعدين . وتتواجد الذرات فى شبكة البلورة على مسافات ثابتة فيما بينها ، تسمى بحيزات الشبكة (lattice spacing). وبشكل عام توجد ثلاثة حيزات ، بحسب ابعاد الشبكات الثلاثة ، وهى : للطول والعرض والارتفاع .

ولا تنتشر العناصر فى الطبيعة بصورتها النقية ، بل بشكل مركبات . وتتكون شبكات هذه البلورات من ذرات متعددة الانواع . ومن الامثلة البسيطة على ذلك بلورات الجليد . وفيها نوعان من الذرات ــ الاوكسجين والايدروجين ، ويبلغ عدد ذرات الايدروجين ، بموجب معادلة تكون الماء ، ضعف عدد ذرات الاوكسجين .

واليكم مثال آخر ، وهو شبكة بلورات الملح (NaCl) . فنجد فى محل تقاطع اجزاء الشبكة (وتسمى بالعقد) ايونات الصوديوم والكلور مرتبة بصورة متعاقبة . وهى ايونات وليست ذرات . ومن الاهمية بمكان انه عندما تجمد جزيئات الملح وتتحول الى جسم صلب فانه يتبقى مع ذلك الطابع الايونى للروابط بين ذراتها .

لكن الجزىء كجزىء يختفى من الوجود . ولا يمكن عزله بصورة منفردة . وفى الحقيقة ان كل ايون من الصوديوم يكون محاطا بالكلور ، وكل ايون من الكلور يكون محاطا بايونات الصوديوم . فاذهب وحاول ايجاد الجزىء السابق !

وتوجد بين هذه الايونات قوى كهربائية اعتيادية . فيجذب ايون الصوديوم اليه ايونات الكلور فى المجال المحيط به مباشرة ، بينما تجذب هذه اليها ايونات اخرى للصوديوم ، لكنها تنفر من ايونات الكلور المجاورة . ونتيجة لتلاعب قوى الجاذبية هذه والتنافر يتكون نوع من التوازن فى ترتيب الايونات . وهذا هو بالذات شبكة البلورات .

ويكون هذا الترتيب متوازنا وثابتا فعلا . فما ان يخرج احد هذه الايونات عن مكانه حتى تضعف قوة جاذبيته للايونات من النوع الآخر ، بينما تطرده الايونات المشابهة له بقوة اكبر . ويؤدى التأثير المشترك لهذه القوى الى اجبار الا يون على العودة الى مكانه السابق .

ومجمل القول ان الايون يهتز طيلة الوقت بالقرب من مكانه الثابت لدى حدوث « الدفعات » الحرارية الاعتباطية ، فهو كالكرة المربوطة بواسطة عدة زنبركات فى آن واحد . وتحدد الاهتزازات الحرارية للايونات فى الشبكة الكثير من صفات الاجسام الصلبة .

ان ميكانيكا الكم لا تعبأ كثيرا بالبلورات الايونية كما هو الامر فى حالة الجزيئات الايونية . لكن الفيزياء تتجه الآن الى اكثر البلورات الفلزية اهمية بالنسبة للتكنولوجيا الحديثة .

لكن الوضع يختلف هنا تماما . فلنفرض بان كل الشبكة تتكون من فلز واحد ، اى من ذرات نوع واحد منفرد . فمن السهل

عندئذ ادراك بانه لا يمكن ان توجد اية ايونات مشحونة مختلفة . فاذا ما تخلت احدى الذرات بطيبة خاطر عن الالكترون ، فما الذى يمنع الذرات الاخرى من القيام بذلك ايضا ؟

وربما كان الحال بهذه الصورة ؟ فلا زالت ميكانيكا الكم تذكر جيدا الانتصار على جزيئة الايدروجين . فماذا لو كانت بلورة الفلز هى حقا « جزيئا » اسهاميا ضخما ، يتألف من كثير من ملايين وملايين الذرات ؟

وقد ثبتت صحة هذه الفكرة الذكية . فلم تستحدث الطبيعة اى شىء جديد . فلقد نجحت « حيلة » تبادل الالكترونات بين ذرتين من قبل ... وها ان الطبيعة تنقل هذه التجربة على نطاق اوسع الى مجموعات كبيرة من الالكترونات .

ومع ذلك ، فان هذه القضية ليست بمثل هذه السهولة والبساطة . ان الاجسام الصلبة سوف تظهر اكثر من مرة بانها بندقات لا يمكن ان تكسرها حتى اسنان ميكانيكا الكم الحادة .

هياكل وطوابق البلورات

عندما تتحدد ذرات الفلزات فى بلورات ، فانها تجعل فى الواقع الكتروناتها عامة للجميع . وفى النتيجة تركيب معمارى « هيكلى » خاص فى هذه البلورات . وتربض فى الشبكات ايونات بطيئة الحركة محاطة بسحابة الكترونية خفيفة ومتحركة . وتلعب هذه السحابة دور

الاسمنت الذى يربط سوية الايونات المتشابهة الشحنات والمعادية .
اما الايونات نفسها فتلعب دور الاسمنت بالنسبة للالكترونات التى
تسعى للتطاير فى مختلف الاتجاهات .

وكما قلنا سابقا فان الالكترونات فى الفلز تكون حرّة « تقريبا ».
وفى الواقع ، فانه عندما تقدم كل ذرة حصتها فى المأدبة المشتركة ،
فان كل الكترون لا يصبح ملكا لذرة واحدة ما ، بل خادما لملايين
وملايين وملايين السادة من الذرات. ويحصل على حق التجول بحرية
فى كل البلورة ... فهو فيجارو ميكروسكوبى !

ولابد من القول بان ليس جميع الالكترونات تكتسب هذه
الحرية . فالذرات لا تتخلى الا عن واحد او اثنين من الالكترونات
الخارجية ، بينما يجلس الباقون « حبيسين » لدى « سيدهم » . ولكن
جيش الالكترونات الحرّة مع كل هذا كبير جدا : ففى السنتيمتر
المكعب من الفلز يبلغ عدد الالكترونات حوالى $١٠^{٢٢}$ — $١٠^{٢٣}$.

ويكون للبلورة الفلزية ، اذا جاز لنا هذا التعبير ، نظام
« اجتماعى » اكثر تنظيما بالمقارنة مع بلورة الايونات . والاخيرة
تشبه مجتمع العبودية : اذ تعانى كافة الالكترونات من حياة العبودية
فى ذراتها . اما الفلز فهو قريب من المجتمع الاقطاعى : اذ يعتق
السيد جزءا من عبيده لتحقيق الفائدة منهم .

وقد اكسب هذا التعديل الفلز فورا صفات جديدة . كما
حصل الفلز على القابلية لتوصيل التيار الكهربائى .

واذا ما طبقنا المجال الكهربائي الاعتيادى على البلورة الايونية فانه تحدث اعادة توزيع قليلة فقط ، من أجل ان يشد السحب الالكترونية الى ذراته . ويكون من نتيجته ظهور ما يسمى بالاستقطاب الكهربائي للبلورة . ولكن لا يتحرر اى الكترون من الايونات ، بينما تبقى الايونات نفسها « جالسة » في عقدها . وهذا يعنى بانه ما دامت لا توجد ناقلات حرة للشحنات الكهربائية فلا وجود اذن للتيار الكهربائي نفسه . وبلورات الايونات نفسها هى عوازل .

هذا وان ناقلات الشحنات الكهربائية ــ الالكترونات ــ فى الفلزات (المعادن) كثيرة جدا . لذا فهى توصل التيار الكهربائى بصورة جيدة .

ولكن اين مكان اشباه الموصلات فى كل ذلك ؟ سنعين هذا المكان بعد قليل .

وسنبحث الآن حقيقة هامة وضعتها ميكانيكا الكم للفلزات . فما هى الطاقات التى تمتلكها الالكترونات « شبه الجماعية » فى الفلزات ؟ ان الجواب على ذلك يبدو بسيطا . فقد تحررت الالكترونات من الذرات وبذلك يمكن ان تمتلك اية طاقات . ونحن نتذكر بان الطبيعة الكمية لمجالات الطاقة فى الالكترونات الحرة تختفى .

ولكن علينا ان لا نتسرع فى تقديم مثل هذا الاستنتاج. فالواقع ان الالكترونات خرجت من الذرات لكنها لا زالت باقية فى قطعة الفلز او المعدن . وهى لا تخضع الآن لقوانين الذرات ، لكن توجد

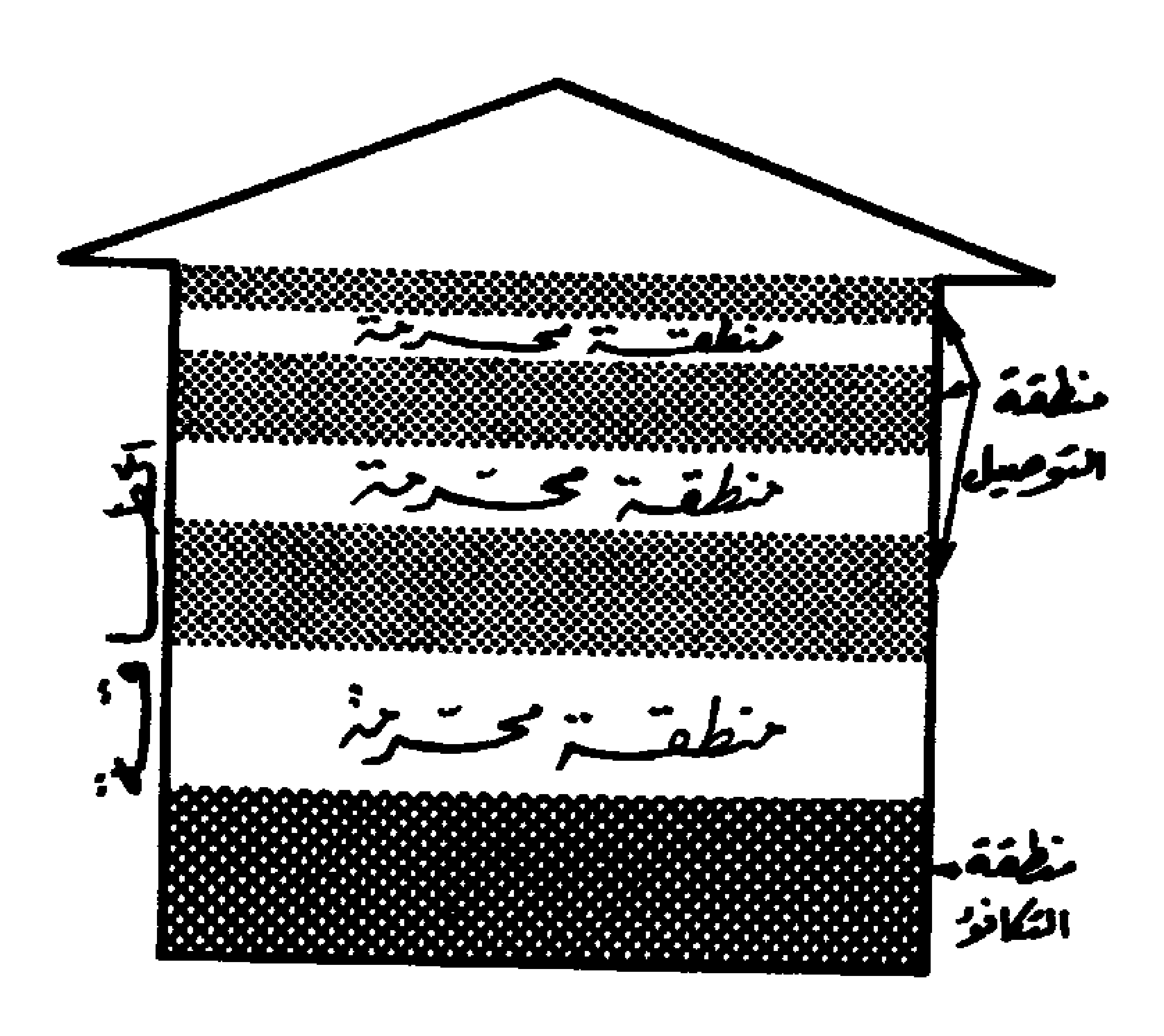
هناك قوانين عامة للفلزات ، التى تتحكم فى سلوك لا الكترون واحد بل جيش كامل من الالكترونات .

فما هى هذه القوانين ؟ ان القوانين الذرية كما تذكرون قد وجدت من حل معادلة شرودنجر . وأخذ الفيزيائيون بطريقة مشابهة فى محاولة معرفة قوانين حياة الالكترونات فى البلورات الفلزية . فقاموا بحلّ معادلة شرودنجر لحركة الالكترونات فى المجال الكهربائى الدورى للايونات الموجبة ، المرتبة بشكل منتظم فى عقد الشبكة البلورية للفلز .

ويمكن ان نترك الموضوع هنا قليلا . فاننا حتى الوقت الحاضر كنا لدى الحديث عن كيفية تأثير احدى الذرات على ذرة اخرى فكأنما كنا نشير بذلك الى الجانب السطحى من هذه الظاهرة . فالذرات قد تتنافر الواحدة عن الاخرى بعد اصطدامها ، او تتجاذب وتكون الجزيئات .

ولكن ماذا يحدث عندئذ فى داخل الذرات نفسها ؟ لقد ظهر بان السحب الالكترونية تغير هيئتها . وقد امكن توضيح ذلك بفضل الظاهرة التى اكتشفها العالم الفيزيائى شتارك (Stark) قبل ظهور ميكانيكا الكم بشكلها الحديث . وذلك عندما وجد شتارك بانه لدى تعريض مجال كهربائى قوى لمادة ما فتنفصل او تجزأ خطوط الطيف الضوئى للمادة المشعة .

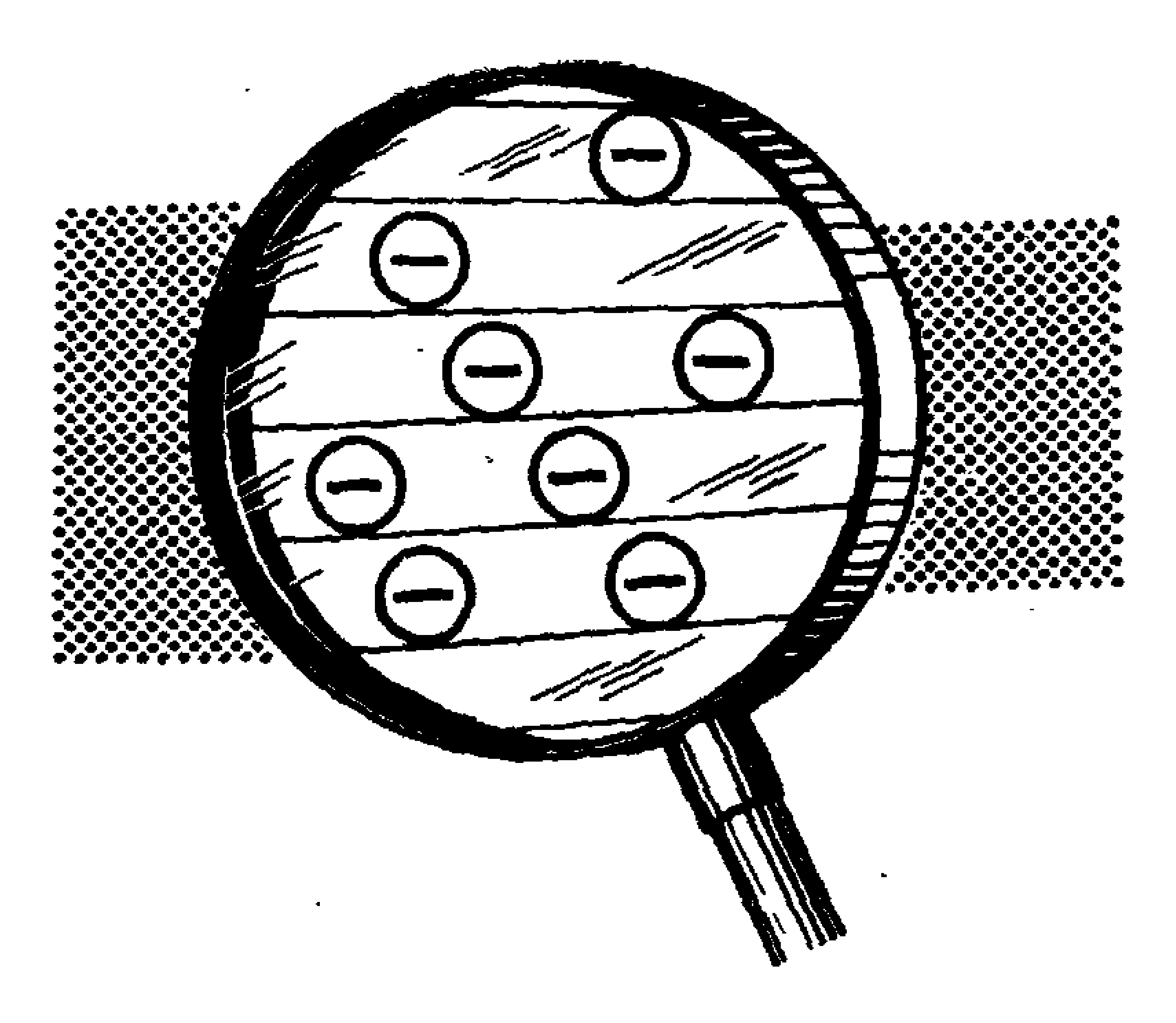
فهل ان هذه الظاهرة تشبه الى حدّ ما ما وصفناه سابقا لدى



شكل ١٤

الحديث عن الخطوط المزدوجة ... كلا ، ان هاتين الظاهرتين مختلفتين تماما. اما الشيء الذى يجمع بينهما بلا شك — وقد استطاعت ميكانيكا الكم اثبات ذلك — فهو ان انفصال خطوط الطيف الضوئى يطابق انفصال مجالات الطاقة فى الكترونات الذرة .

وباختصار ، ان المجال الكهربائى الذى يوجه من الخارج الى الذرة يحطم مستويات الطاقة لالكتروناتها . وان عمل المجال الكهربائى للذرة التى تقترب بمسافة صغيرة بدرجة كافية من ذرة اخرى (ويكون المجال عندئذ كبيرا جدا) ، لا يختلف فى جوهره عما ذكرناه .



شكل ١٥

وفى الواقع انه عند تكون جزىء ما فانه تختفى مستويات الطاقة المناظرة للذرات المنفردة الداخلة فيها . وهى تتحطم وتمتزج وتتحرك الى اعلى واسفل فى مدرج الطاقة ، وفى النتيجة تكون مستويات الطاقة الجزيئية ، التى تناظر الجزىء ككل .

وما يصح بالنسبة للجزىء يظهر بشكل اكثر وضوحا بالنسبة للبلورة ، حيث تكون اعداد هائلة من الذرات ، قريبة من بعضها البعض مباشرة ، ويتكرر هذا الاقتراب فى كل اجزاء البلورة . والحقيقة ان البلورة هى جزىء ضخم « متجمد » .

ان المجال الكهربائى الموحد لكافة ذرات هذا « الجزىء » يجزأ مجالات الطاقة لكل منها الى عدد ضخم من المجالات الصغيرة

المزدحمة جدا . ويختفى عمليا تماما انفصال وانعزال مجالات الطاقة المسموح بها للالكترونات . ولهذا يبدو كما لو ان البلورة تمتلك القابلية لاكتساب اية طاقة .

وهنا حدث شيء رائع . انظر الى الشكل ١٤ فتجد عندها بان الاستنتاج الذى وصلنا اليه اعلاه حول امكانية حصول الالكترون فى الفلز على اية طاقة يتحقق نوعا ما ، باستثناء حالة وحيدة هامة جدا . فهل ترى المناطق البيضاء الكائنة بين الاجزاء المنقطة ؟ انها تمثل الطاقة الحبيسة للالكترونات فى هذه المناطق ، والتى لا يمكن ان تتواجد فى الفلز . وتناظر هذه الطاقة دالة موجة الصفر ، وبالتالى فان احتمال وجود الالكترون فى هذه الحالة يساوى صفرا ايضا . وتسمى هذه المناطق البيضاء بالمناطق المحرمة .

ولا يكتسب الالكترون اية طاقة ، حتى فى الاجزاء المنقطة للطاقة ، المسماة بالمناطق المباحة . ولو تسنى لنا رسم الصورة الحقيقية لذلك على ورقة ، فسنلاحظ وجود مستويات طاقة منفصلة ايضا فى هذه المناطق . وعددها كبير جدا فى هذه المناطق (تذكر بانه يوجد فى كل سنتيمتر مكعب من الفلز عدد لا يحصى من جموع الالكترونات) حتى انها تتداخل فى تتابع مستمر .

ولكن كيف « تجلس » الالكترونات فى هذه المستويات ؟ لقد تبين بانها تجلس لا كيفما اتفق ، وكأنها عصافير فوق اسلاك الكهرباء . اذ يمنعها من ذلك قانون باولى ـ المفتش الصارم « للفن

المعماری الذری» الذی ورد ذکره اعلاه . وهو یراقب عملیة « الاسکان » فی الجزیء بنفس الاهتمام فی حالة الذرة .

ویقول مبدأ باولی بانه یمکن ان یتواجد فی کل مستوی فی المنطقة غیر المحرمة من الفلز الکترونان فقط . والمکان کبیر ، کما ان المستویات کثیرة بدرجة کافیة بل واکثر . وتوجد فی الفلز دائما مساحة تفیض عن الحاجة من « مناطق السکن » . وتستطیع جمیع الاکترونات ، فی الظروف الاعتیادیة ، ان تشغل المنطقة السفلی وغیر المحرمة فی « الطابق الاول » .

فماذا یوجد تحت هذه المنطقة ؟ یوجد هناك « الدور التحتانی » الذی تقطنه الالکترونات المنعزلة ، للذرات المنفردة ، ولیس لجمیع ذرات الفلز عموما . ولا ینعزل الدور التحتانی عن الطابق الاول تماما ، اذ یوجد بینهما سلم . ویتألف من درجة واحدة ، یبلغ ارتفاعها نفس ارتفاع المنطقة المحرمة الاولی . ویستطیع الالکترون ان یطیر من الدور التحتانی الی الطابق الاول اذا ما « دفع » کما ینبغی ، وهو لا یستطیع البقاء فی المنطقة المحرمة بسبب نقص الطاقة .

وقد اطلق الفیزیائیون علی الدور التحتانی للطاقة تسمیة منطقة التکافؤ (valence zone) ، اما المناطق الاخری غیر المحرمة للطاقة فتسمی جمیعا باسم مناطق التوصیل (conduction bands) . ومن السهل معرفة اصل هذه التسمیة : اذ تقطن الالکترونات

الخارجية التى تحدد مقدار التكافؤ الدور التحتانى ، لكنها غير حرة بعد ، اما فى الطابق الاول وما فوقه فتقطن الالكترونات التى تساهم فى توصيل التيار الكهربائى .

العوازل تستطيع توصيل التيار ايضا !

من المفهوم ان جميع الالكترونات فى العوازل دون استثناء تختبىء فى الدور التحتانى . وتكون منطقة توصيلها فى الظروف الاعتيادية خالية : فالمنطقة المحرمة الاولى واسعة جدا ، وليس للالكترونات الطاقة الكافية من اجل عبورها . ولكن عندما يسخن العازل بشدة فان طاقة اهتزاز ايوناته فى عقد الشبكة تصبح كبيرة . ويمكن ان تنتقل الى الالكترونات ، فتكتسب هذه « دفعات » قوية تكفى لحملها الى منطقة التوصيل . فيبدأ العازل بتوصيل التيار الكهربائى. وتسمى هذه الظاهرة بالانهيار الحرارى (the heat breakdown) .

وفى الحقيقة ان تفسيرها لا يتطلب حتى اللجوء الى ميكانيكا الكم . فان سقوط الالكترون فى منطقة التوصيل لا يعنى سوى انطلاقه من ذلك العالم الضيق الصغير الذى وجد فيه حتى تلك اللحظة واصبح حرا تقريبا . وان الطاقة اللازمة لتحريره تساوى عرض المنطقة المحرمة التى تفصل ما بين الدور التحتانى والطابق الاول .

ويمكن تصوير الامر كما لو ان « الدفعة » الحرارية قامت

بطرد الالكترون من الذرة ، وجعلتها متأينة . اما الالكترون الخارج من الذرة فانه لا يمتلك القدرة بعد لمغادرة قطعة العازل ، فهو يواصل حركته داخلها بكل حرية .

ولكن يظهر بان العازل يصبح موصلا للتيار الكهربائى فى حالة اخرى ، وهى عندما يوضع فى مجال كهربائى قوى جدا . ولكن ، مهلا ... ان هذه الظاهرة معروفة جيدا بالنسبة لنا .. فهى نفس ظاهرة الابتعاث البارد للالكترونات من الفلزات ، والتى ذكرناها فى الباب الماضى . غير ان الحديث جرى آنذاك حول الفلزات اما الآن فهو يدور حول البلورات الايونية . وهناك تتطاير الالكترونات الى « الخارج » . اما الآن فانها تنتقل من منطقة التكافؤ الى منطقة التوصيل .

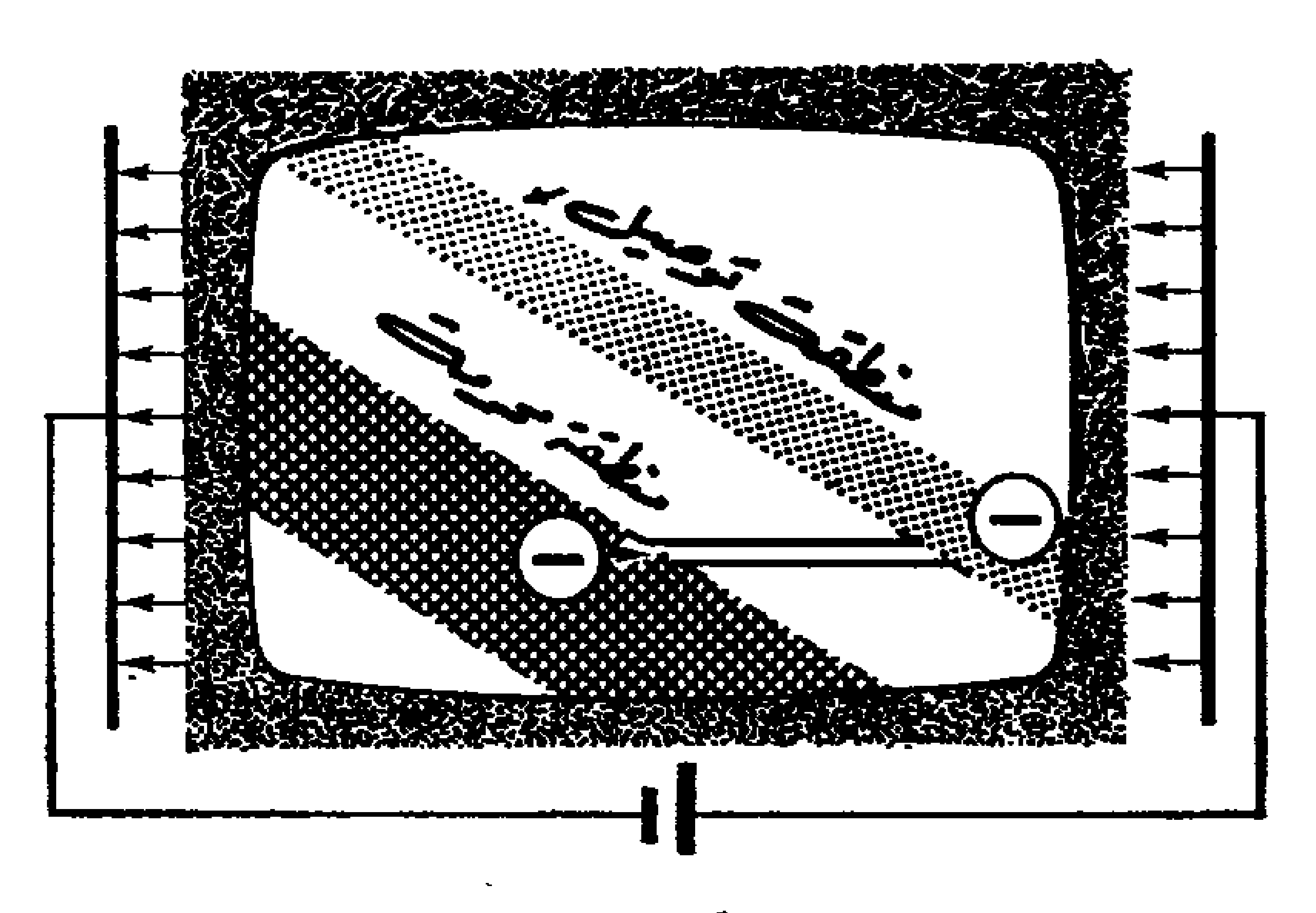
ومع ذلك ، وبالرغم من هذه الاختلافات ، فان هذه الظاهرة هى نفسها فى الحالتين . فهنا وهناك تحدث « معجزة » تأثير النفق .

والواقع ان المنطقة المحرمة ما هى الا الحاجز الجهدى الذى لا نهاية لطوله من الناحية التطبيقية (اى بالنسبة للالكترون طبعا) . وهى نفسها الدرجة التى لها جانب « امامى » فقط . ويقوم المجال الكهربائى بثنيها ويكون لها جانب « خلفى » ايضا . وفى النتيجة يكتسب الحاجز طولا محددا .

اما بعد ذلك فيتكرر الامر كما فى السابق . فتبدأ الالكترونات بالتسرب عبر الحاجز من منطقة التكافؤ الى منطقة التوصيل . ويظهر



شكل ١٦



شكل ١٧

فى بادئ الامر تيار كهربائى ضعيف ، فبما ان احتمال التسرب غير كبير لذا تخرج الالكترونات الى منطقة التوصيل بكميات قليلة . لكن لدى مرور هذا التيار خلال البلورة فانه يسخنها . ويشبه فى ذلك السلك الحلزونى فى السخانات (المدفئات) الكهربائية .

ويضيف التسخين بدوره مجموعات جديدة من الالكترونات الى منطقة التوصيل . فيحدث كما لو ان التيار يطارد نفسه فى العازل !

وبعد لحظة قصيرة يبدأ حدوث التصدع الكهربائى فى العازل . ويصاحبه في العادة تصدع حرارى ايضا . فيبدأ العازل بالذوبان . وبعد ذلك يمكن ان يرمى العازل بكل بساطة مع النفايات ، اذ يصبح عديم النفع .

ولكن هناك طرق اكثر « هدوءا » فى تكوين التيارات الكهربائية في العوازل . وهذه التيارات ضعيفة جدا ، ولا يمكن ان تسبب له اية اضرار . وهى طريقة انارة البلورات الايونية . فانه عندما تدخل الفوتونات الى البلور تقوم بطرد الالكترونات من منطقة التكافؤ الى منطقة التوصيل . ويكون التأثير الضوئى آنئذ « داخليا » لا « خارجيا ». وهو شيء غير مضر بل نافع جدا بالنسبة للكثير من الامور العملية .

كيف يتحرك التيار فى الفلز ؟

قد يخجل المرء في قرننا العشرين حتى من مجرد توجيه مثل هذا السؤال . فالالكترونات تدخل من احد طرفى مصدر التيار ويقوم المجال الكهربائى بمطاردتها فى الفلز حتى تخرج من الطرف الآخر . فهى تشبه تيار من الماء يسحب عبر ماسورة .

لكن يجب ان لا نخجل من توجيه هذا السؤال . فليشرح لنا من ينتقد ذلك اذن لماذا تتكون المقاومة الكهربائية . فالموصل

ليس ماسورة ، وجدرانه ليست خشنة . ولماذا يقاوم الفلز الذى يحتوى على عدد هائل من النواقل ، رغم كل ذلك حركة التيار ؟

ان هذا السؤال هو احد تلك الاسئلة « الساذجة » التى يتطلب الاجابة عليها ذكاءا ومعرفة كبيرتين . وقد عرف الانسان بوجود التيار منذ اكثر من قرن ونصف . لكن الجواب على السؤال المذكور لم يأت الا قبل حوالى ٣٠ عاما .

وتحاول الفيزياء الكلاسيكية شرح المقاومة الكهربائية كما لآتى : ان اتجاه حركة الالكترونات — وهو ما يسمى بالتيار — يعترض دائما من قبل الذبذبات الحرارية للايونات فى « هيكل » المعدن. وتعمل هذه الذبذبات على انحراف الالكترونات عن خط سيرها. وتبدأ الالكترونات بالحركة مثلها فى ذلك مثل البشر ، فى بناية تتأرجح جدرانها وتهتز ارضيتها.

فمن الواضح انه كلما كانت اهتزازات الجدران والارضية قليلة كلما كان السير فى ارجاء البناية اكثر سهولة . وان المقاومة الكهربائية ينبغى ان تصل الى الصفر عندما تبلغ درجة الحرارة درجة الصفر المطلق ، و تتوقف الذبذبات الحرارية للايونات تماما .

وهو امر يطابق الواقع تقريبا، وعلى اقل تقدير بالنسبة للفلزات النقية والتى تنعدم فيها الشوائب جميعا من الناحية العملية . ان اصل المشاكل يتأتى من هذه الشوائب . وعندما تنخفض درجة الحرارة فان مقاومة مثل هذه الفلزات « الملوثة » لا يميل الى الصفر ، بل الى

مقدار لا صفرى يتوقف على محتويات ونوع الشوائب فى الفلز . وكلما ازدادت الشوائب فيه ارتفعت المقاومة المتخلفة له .

فماذا تقول الفيزياء الكلاسيكية بهذا الشأن ؟ لا شيء . فهى لا تفرق بين ذرة الفلز وذرة الشائبة ما دام كلاهما يهتزان فى درجة حرارة معينة بنفس النشاط ، ويعرقلان الحركة فى البناية بنفس الشكل .

وقد اثبتت ميكانيكا الكم بانها ذات «قوة ملاحظة» اكبر اذ ميزت بوضوح بين ذرة الفلز وذرة الشائبة ، كما لو كانتا مختلفتين فى اللون . فما هو تفسيرها للمقاومة الكهربائية ؟

علينا ان نسترجع اولا التجربة الفاخرة التى بدأنا بها حديثنا حول ميكانيكا الكم ، وهى تجربة حيود الالكترونات فى البلورة ، عندما انعكس فيها قسم من الالكترونات على طبقات الذرات الخارجية للبلورة ، مكونة حلقات الحيود على اللوح الفوتوغرافى .

الا يمكن اعتبار تيار الالكترونات فى الفلز كحزمة من الالكترونات ؟ نعم ، ممكن طبعا . فان الالكترونات تتحرك هنا ايضا فى صفوف متراصة وباتجاه عام واحد ، لكن هذه الحزمة اوسع ، وتشغل كل مقطع قطعة الفلز . وعندئذ لا مفر من ان يصاحب مرور الالكترونات فى الفلز نوع من «الحيود الداخلى» للالكترونات على ايونات الشبكة . واذا ما وضعنا لوحا فوتوغرافيا داخل الفلز فسنحصل عندئذ على نمط الحيود المتكون عليه .

ويتميز هذا الحيود بصفة هامة . وهى انه حال حدوث اختلال

فى ترتيب الاشياء التى تبث الموجات يختفى النمط الواضح ، ويبدو اللوح الفوتوغرافى وكأنه تعرض لاشعة ضوئية متساوية فى الشدة . وكما يقول الفيزيائيون فان انتشار الموجات يصبح عندها متجانسا .

هذا هو الاخلال بالنظام الذى يحدثه اهتزاز الايونات فى التركيب المنتظم للبلورة الفلزية ، بالاضافة الى وجود ذرات غريبة من الشوائب فيها . وبنتيجة ذلك فان موجات الالكترونات المشتركة فى التيار تنتشر فى جميع الاتجاهات .

وكقاعدة يكون لذرة الشائبة مقاييس وقشرة الكترونية مختلفة عما فى ذرة الفلز . وعندما تدخل ذرات الشائبة فى الشبكة فانها تشوهها . واذا ما واصلنا التشبيه فيمكن مقارنة ذرة الشائبة من حيث التأثير بانها تؤدى الى اعوجاج ردهة البناية وتشوه الارضية فيها بصورة مفاجئة . ومن الواضح ان هذه العيوب ستبقى حتى عندما تتوقف الجدران والارضية عن التأرجح . والواقع ان التشويه الذى تحدثه ذرات الشائبة فى شبكة الفلز لا يتوقف على درجة الحرارة ، ويبقى حتى اذا ما كانت تساوى الصفر المطلق . ان انتشار الموجات الالكترونية فى تشوهات الشبكة هذه هو السبب فى المقاومة الكهربائية المتخلفة للفلزات الذى استعصى تفسيره على الفيزياء الكلاسيكية .

وهكذا فقد تبين بان الفلزات لا تعتبر موصلات مثالية للتيار رغم كونها تقوم بهذه المهمة بصورة طيبة . صحيح ، ان ذلك لا ينطبق على جميع الفلزات وفى جميع الاوقات . وان الطبيعة قررت ،

كما لو كانت غير راضية بما صنعته يداها ، ان تظهر بانها قادرة على عمل شيء اعظم . فاوجدت الفلزات التى تتصف بخاصية فرط الموصلية (superconductivity) .

فتبدأ بعض الفلزات والسبائك (وعددها الآن قليل يعد على اصابع اليد) تسلك سلوكا غريبا جدا فى درجات الحرارة الواطئة جدا . فتأخذ هذه المواد عند حوالى ١٠ درجات فوق درجة الصفر المطلق ، فجأة ، بتخفيض مقاومتها الكهربائية الى الصفر . وقد سميت هذه الظاهرة التى اكتشفت قبل نصف قرن من الزمان بظاهرة فرط الموصلية .

ولم تستطع الفيزياء الكلاسيكية تفسير هذه الظاهرة . ومن الجدير بالذكر انه حتى ميكانيكا الكم « الجبارة » اضطرت للعمل المجهد حوالى ٣٠ عاما قبل ان تحقق النجاح فى ذلك . وقد تبين بان هذه الظاهرة « شيطانية » حقا !

وفى السنوات الاخيرة تم حلّ لغز فرط الموصلية . وقد ساهم فى حل رموزه مساهمة كبرى العالم الفيزيائى السوفييتى ن . بوجولوبوف وتلاميذه . ونحن لا نستطيع اعطاء شرح مفصل لذلك على صفحات كتابنا هذا لضيق المجال . فنكتفى بايراد تشبيه موجز ، ليعطى صورة واضحة عن الموضوع ، لكنها عامة جدا .

ان خدعة فرط الموصلية تكمن فى انه يحدث فى عدد من الفلزات بحكم خصائص تركيبها تغير جذرى فى العلاقة المتبادلة

بين القشرة الالكترونية و « الهيكل » الايونى عند درجات الحرارة المنخفضة جدا والقريبة من الصفر المطلق . واذا كان كل « جندى » فى « الجيش الالكترونى » يحارب لوحده ، فانه عند درجة حرارة ظهور فرط التوصيل تبدأ الالكترونات بالتجمع فى ازواج .

ويؤثر ذلك فورا على طبيعة « الحرب » الجارية فى الفلز بين الالكترونات والايونات . فاذا ما كان كل الكترون يشارك من قبل فى الاصطدامات مع الايونات بصورة منفردة ، مما يسهل طرده و « القضاء عليه » ، فان الالكترونات التى تتحرك بشكل ازواج لا تهتم بقيد شعرة بهجمات الايونات المفردة عليها عندما تقابلها فى طريقها . ويحدث كما لو ان الالكترونات تكف عن ملاحظة الحصار الايونى المعادى حولها .

ومما لا شك فيه ان المصاعب التى يلقاها « الجيش الالكترونى » فى طريقه تنخفض بشكل ملحوظ . ونتيجة لهذا تقل المقاومة الكهربائية للفلز .

وتتلخص طريقة « الحرب » الجديدة ، بلغة الفيزيائيين ، فى كون اطوال الموجات الآن والتى تناظر حركة الالكترونات فى الفلز هى اكبر بآلاف وعشرات آلاف المرات من المسافات بين الايونات . واذا ما قرأت هذا الباب بامعان فستدرك فورا سر « التكتيك » الجديد : فان طول موجة زوج الالكترونات هو اكبر بكثير من حجم الحواجز الايونية التى تعترض طريقه ، مما يؤدى الى زوال

ظاهرة استطارة الالكترونات المفردة التى تصاحب سير التيار عبر الفلز فى الظروف الاعتيادية . ومعها تزول مقاومة التيار .

ولا يتوفر هذا التنظيم المثالى للجيش الالكترونى الا عندما تكون درجات الحرارة منخفضة بدرجة كافية . وعندما ترتفع درجة الحرارة فوق حد معين فان الاصطدامات مع الايونات تؤدى الى انفصال ازواج الالكترونات عن بعضها البعض وتكون جنود منفردين . وعندها يحارب الجنود العدو افرادا ، وتعود المقاومة الكهربائية للظهور من جديد .

من ذلك نجد بان الحديث عن كيفية سير التيار فى الفلز لا يخلو من فائدة .

« اشباه الاشياء » العجيبة

ربما حزر القارئ عن اية اشباه اشياء سيدور حديثنا الآن . فيوجد فى الطبيعة عدد كبير من الاشياء التى هى ليست من موصلات التيار الكهربائى ولا العازلة له ، بل هى اشباه موصلات .

وقد ظهر بان الصفات البينية لاشباه الاشياء هذه ذات قيمة كبيرة ، فاحدثت اشباه الموصلات التى اكتشفت قبل بضعة عشرات من السنين ثورة حقيقية فى التكنيك . وربما يعرف القارئ هذه الصفات ايضا : وهى ان اشباه الموصلات تستطيع نقل التيار فى درجات الحرارة الاعتيادية وهى تختلف فى ذلك عن العوازل ، كما

انها تختلف عن الموصلات فى كون مقاومتها الكهربائية لا تزداد بارتفاع درجة الحرارة ، بل الامر بالعكس تماما .. اذ تنقص .

ولم تضع الطبيعة حدا فاصلا بين العوازل والموصلات واشباه الموصلات . الا اننا نعرف اليوم فى الواقع الهوة التى تفصل فيما بينها . وهى المنطقة المحرمة الاولى بين منطقة التكافؤ المملوءة بالالكترونات ومنطقة التوصيل التى توجد فيها حالات الكترونية غير مشغولة كثيرة .

وتحتاج الالكترونات فى العوازل الى طاقة كبيرة من اجل تسلق الدرجة التى تفصل بين الدور التحتانى الضيق والطابق الاول الفسيح . لان هذه الدرجة عالية جدا . ولا يستطيع الالكترون الحصول على هذه الطاقة الا فى درجات الحرارة العالية (تذكر الانهيار الحرارى) .

لكن هذه الدرجة تكون فى اشباه الموصلات واطئة جدا . وتستطيع الالكترونات الموجودة فى الدور التحتانى ان تكتسب الطاقة اللازمة لتسلقها وذلك فى درجات الحرارة الاعتيادية . لذلك فان الطابق الاول فى اشباه الموصلات يبدأ باستقبال الالكترونات قبل هذا الحين . وتستطيع هذه الاشياء توصيل التيار الكهربائى ولو بشكل ضعيف فى درجات الحرارة الاعتيادية .

وبتعبير آخر ، فانه عند توجيه مجال كهربائى ضعيف الى شبه الموصل ، تتولد فى الاخير حركة موجهة للالكترونات فى منطقة التوصيل. ولنتأمل فى ما يجرى عندئذ من احداث فى الدور التحتانى .

فهناك تدور امور مسلية ايضا . اذ بعد ان ينتقل الالكترون الى الطابق الاول يترك خلفه شقة فارغة . ويجرى فى الحال تقاسم ارض هذه الشقة بين ساكنى الدور التحتانى المزدحم. ولكن لا يستطيع ان يشغلها سوى ساكن واحد ـ الكترون واحد . ويشغلها احد الالكترونات القريبة . غير انه يخلى شقته السابقة . فينتقل اليها احد الالكترونات بدوره ايضا .

وتقلد الالكترونات فى الدور التحتانى فى انتقالها من شقة الى اخرى الالكترونات المتحركة بحرية فى الطابق الاول . ويبدو ذلك كتقليد حيوان الكنغر للعدّاء . فالعداء يقوم بقفزات صغيرة نسبيا وسريعة ، ولا يمكن ملاحظتها عن بعد . فتبدو كما لو انه يزيد سرعته بصورة انسيابية . اما الكنغر فانه يتحرك بقفزات طويلة وبطيئة .

واذا ما اعتبرنا بان الشقة الالكترونية الاولى قد اخليت فى مركز المدينة فانه يحدث بنتيجة انتقال الالكترونات الى انها تأخذ مكانها فى طرف المدينة فى نهاية الامر .

وقد اطلق الفيزياثيون على هذه الشقة تسمية تنطبق عليها تماما وهى « الثقب » . ومن الواضح انها تسلك سلوكا معاكسا للالكترون الذى تركها . فعندما يتحرك الالكترون فى المجال الكهربائى من اليسار الى اليمين ، فان الثقب الذى تركه وراءه يتحرك بالاتجاه المعاكس ، اى من اليمين الى اليسار . اى يسلك فى المجال الكهربائى

سلوك جسيم مشحون بشحنة موجبة . وبالاضافة الى ذلك فانه يختلف عن الالكترون فى كونه يتحرك بقفزات واطئة نسبيا وكبيرة .

لكن الالكترونات تكون فى درجات الحرارة الواطئة لازالت حبيسة فى الدور التحتانى . وعندما ترتفع درجة الحرارة يزداد عدد الالكترونات المتحررة ، وتزداد شدة التيار ، بينما تنخفض مقاومة شبه الموصل للكهرباء . اى ان الامر يحدث بعكس ما هو جار فى الفلز تماما .

وقد تحدثنا فيما سبق عن اشباه الموصلات النقية فحسب . وسميت آلية التيار سابقا بالتوصيل الذاتى او الحقيقى (intrinsic conductivity) لكن اشباه الموصلات النقية غير ذات اهمية بالنسبة للتكنيك عموما . فان العجائب تحدث عندما تضاف الى اشباه الموصلات بعض الشوائب :

« الاوساخ » المفيدة

الوسخ شيء كريه وضارّ بالنسبة الانسان .

ولكن ما اكثر الناس الذين ينالون العلاج من الامراض بواسطة الاوساخ ، ولكن بتركيب آخر ! ويبين هذا المثال البسيط بان الوسخ « العابر » يكون مضرا دائما تقريبا ، بينما يكون الوسخ « المعين » ويجرعات منتظمة ومحددة بدقة ذا فائدة كبيرة .

وتتلوث اشباه الموصلات بسهولة ايضا ، فهى لا توجد فى الطبيعة لوحدها . وتترسب على بلورات اشباه الموصلات ثم تترسب الى داخلها مختلف انواع الذرات « الاوساخ » — او الشوائب . وعندما تكون الشوائب « عابرة » وهذا هو شأنها دائما ، فانها لا تفيد فى استخدام اشباه الموصلات فى التكنيك . لان الطبيعة لم تضع فى حسابها من قبل ان الانسان سيستخدم اشباه الموصلات لاغراضه !

وتكون بعض الشوائب مفيدة جدا اذا ما اضيفت بجرعات محددة بدقة . ومنها بالذات تبدأ العجائب ، التى يمكن ان تقوم بها اشباه الموصلات :

غير ان ما ينفع البعض قد يجلب الضرر على البعض الآخر . واذا ما رغبنا فى الحصول على فلز ذى موصلية عالية فان جميع الشوائب تكون مضرة بالنسبة له .

ونحن الآن نعرف سبب ذلك . فان ذرات الشائبة تشوه شبكة الفلز لدى تغلغلها فيها . وتؤدى هذه التشوهات الى انتشار موجات الالكترونات الحاملة للتيار بدرجة شديدة . وفى النتيجة تنقص الموصلية الكهربائية للفلز بينما تزداد مقاومته .

غير ان تشوهات شبكة الفلز هى بالذات اساس نجاح اشباه الموصلات . لان تركيب مناطق الطاقة للبلورة حساس جدا تجاه نوع الشبكة البلورية . ولكل بلورة نظام خاص بها لمناطق الطاقة .

ومع هذا فان ذرات الشوائب لا تغير شكل الشبكة كلها بل بعض اجزائها فقط ، القريبة من هذه الذرات . ويتغير فى هذه الاجزاء نمط المنطقة الذى يميز البلورة كلها بشكل ملحوظ . فتظهر فى المنطقة المحرمة التى تفصل بين مناطق التوصيل الواحدة عن الاخرى ، مستويات اضافية للطاقة ، غير محرمة بالنسبة للالكترونات .

لكن هذه المستويات لا تبرز الا حيث توجد ذرات الشوائب . وقد سميت باسم المستويات المحلية او الموضعية ، تمييزا لها عن المستويات الاخرى التى تظهر فى كافة بلورات اشباه الموصلات .

ويكون عدد هذه المستويات ، كقاعدة ، غير كبير . لكنها ذات اهمية عظمى . اذ تستبدل عندئذ الدرجة الواسعة التى تفصل بين الدور التحتانى والطابق الاول بعدد من الدرجات . وبذلك لا يحتاج الالكترون لعمل قفزات كبيرة عبر المنطقة المحرمة لعبورها مرة واحدة . ويستطيع تسلق ، درجات السلم ، ونيل قسط من الراحة فوق كل واحدة منها واستجماع قواه من اجل القيام بالخطوة التالية .

ومن الواضح بانه فى درجات الحرارة الاعتيادية ، وعندما تكون الطاقة الكهربائية المنقولة غير كبيرة ، لا تؤثر مثل هذه السلالم الصغيرة المريحة بشكل حاسم على خروج الالكترونات من الدور التحتانى . ولكن كم عدد هذه السلالم ؟ من الواضح انه نفس عدد ذرات الشائبة فى البلورة .

اى انه يمكن بتغيير عدد هذه الذرات التحكم بالموصلية الكهربائية لاشباه الموصلات .

ويؤثر عدد الشوائب فى الفلز ايضا على موصليته الكهربائية ، ولكن فى اتجاه واحد دائما . وهو انها تنقص بازدياد عدد الشوائب فيه . وتكون حدود التغير ضئيلة نسبيا . ويمكن تغيير الموصلية الكهربائية فى اشباه الموصلات لا من حيث عدد ذرات الشوائب فقط بل ومن حيث نوعها ، وذلك بآلاف وملايين المرات !

الذرات الكريمة والذرات البخيلة

ان اكثر اشباه الموصلات المشابة انتشارا فى الوقت الحاضر هى التى تقوم على العنصرين الكيميائيين الجرمانيوم والسيليكون .

فما هما هذان العنصران ؟ لنلقى نظرة على الجدول الدورى للعناصر لمندلييف ، فسنرى ان السيليكون (رقم ١٤) والجرمانيوم (رقم ٣٢) يقعان فى المجموعة الرابعة .

ولا بد ان القارئ يتذكر كيف اننا سمينا هذه المجموعة بالوسطية . وهذا هو حالها فى واقع الامر . فالجرمانيوم والسيليكون غير موصلين ولا عازلين للكهرباء، اذن فهما من اشباه الموصلات النموذجية .

ونجد على القشرة الخارجية لهذه الذرات اربعة الكترونات . وعند اتحاد الذرات فى بلورة تذهب جميع هذه الالكترونات لتكوين روابط مشتركة بين الذرات . ثم تمضى حياة عبودية فى الدور التحتانى .

لذلك فان السيليكون والجرمانيوم لا ينقلان التيار فى درجات الحرارة الواطئة .

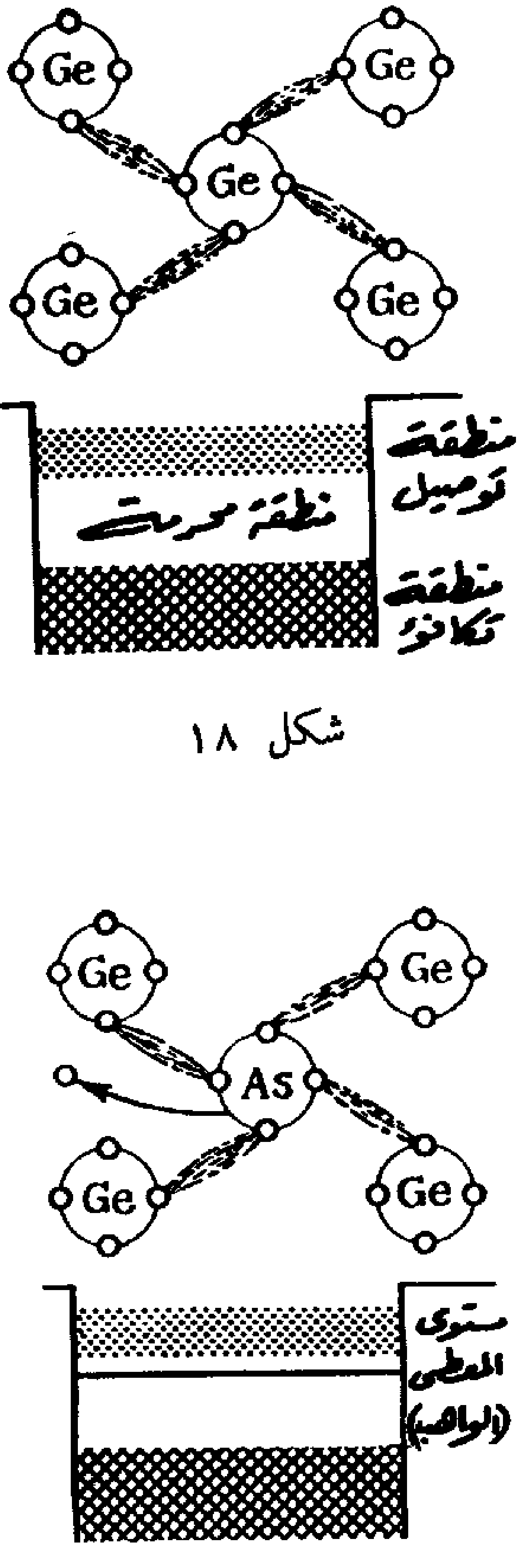
ولكن دعنا نضيف الى الجرمانيوم عنصرا ما من المجموعة الخامسة المجاورة مثل الزرنيخ (رقم ٣٣) . فتطرد ذرات الزرنيخ بشكل ما ذرات الجرمانيوم وتحل محلها فى الشبكة . وعندئذ يجب على كل ذرة من ذرات الزرنيخ ان تقوم بواجبات ذرة الجرمانيوم التى أخذت مكانها .

وتحتوى ذرة الزرنيخ فى الطبقة الخارجية على خمسة الكترونات . فيتخلى اربعة منها لشغل الروابط الكيميائية التى تعود لصاحبة المكان سابقا ــ اى ذرة الجرمانيوم . اما الالكترون الخامس فيبقى بدون عمل .

وتبين الحسابات بان طاقة هذا الالكترون تناظر بالضبط المستوى فى المنطقة المحرمة ، وعند « سقفها » بالذات . ويحتاج هذا الالكترون الى طاقة اضافية صغيرة لغرض الانتقال الى منطقة التوصيل . ويبلغ ارتفاعها بمقدار ١٠ ــ ١٥ مرة اقل المنطقة المحرمة .

وتسمى ذرة الزرنيخ الكريمة التى وهبت الكترونها الى البلورة صاحبة المكان باسم « الواهبة » (donor) . بينما تسمى مستويات الإلكترونات المناظرة باسم المستويات الواهبة (شكل ١٩) .

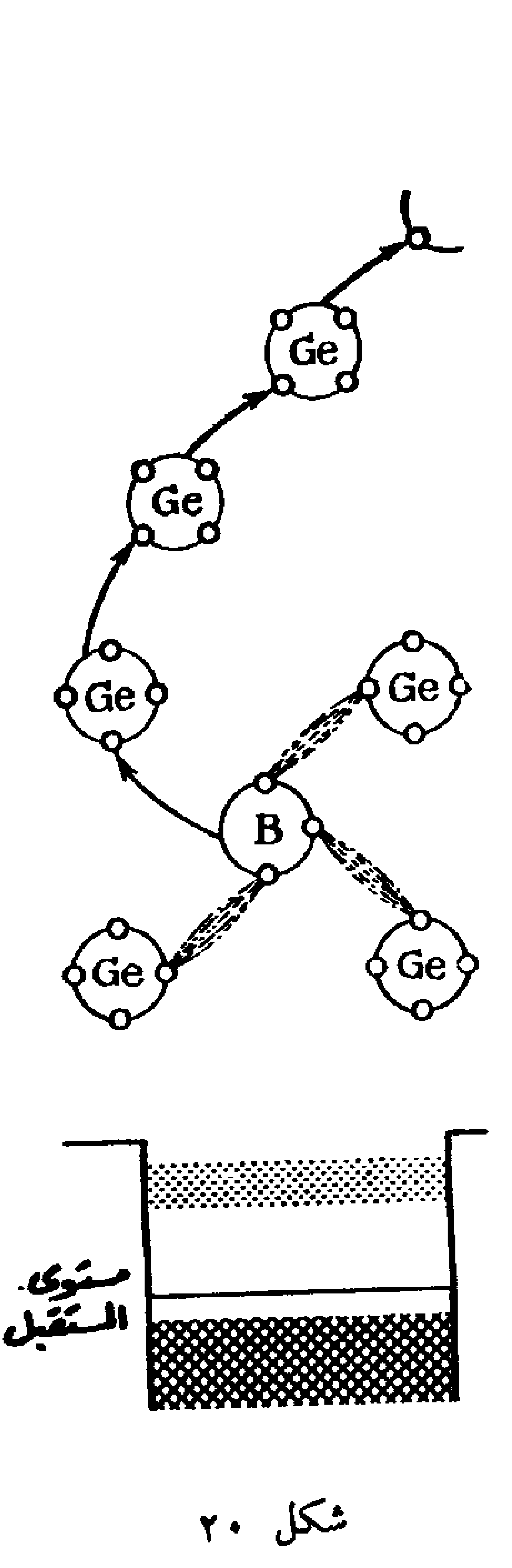
ولكن عند ما نأخذ عنصرا آخر بدلا من الزرنيخ من المجموعة الواقعة الى يسار الجرمانيوم مثل البورون (رقم ٥) . نجد انه يقع



شكل ١٨

شكل ١٩





شكل ٢٠

فى المجموعة الثالثة ، اى توجد ثلاثة الكترونات على القشرة الخارجية لذراته . وعندما تشغل ذرة البورون مكان ذرة الجرمانيوم فانها تستطيع أخذ ثلاث روابط كيميائية فقط من روابط الذرة السابقة صاحبة المكان .

فما العمل ؟ تلجأ ذرة البورون الى سرقة الكترون من ذرة الجرمانيوم المجاورة لها فى الشبكة . وتسرى عدوى « السرقة » الى الذرات الاخرى حتى تشمل السلسلة بكاملها . اما ذرة الجرمانيوم التى تعرضت للسرقة من قبل ذرة البورون ، فانها تسرق نفسها الكترونا من ذرة الجرمانيوم المجاورة لها ، وتسرق هذه هى الاخرى جارتها وهكذا دواليك . وتبتعد الشقة الالكترونية الحرة المتولدة شيئا فشيئا عن ذرة الجرمانيوم التى كانت البادئة فى سرقة جارتها (شكل ٢٠) .

ونحن نعرف كيف يبدو الامر بعد ذلك ... مثل حركة الثقب فى اجزاء البلورة . ولكن سببه فى هذه الحالة ليس طرد الالكترون من منطقة التكافؤ بفعل الحرارة ، بل وجود ذرة البورون .

ونلاحظ فى هذه العملية ايضا تكون مستويات الطاقة المحلية فى اقصى « القاع » بالقرب من المنطقة المحرمة . ولكن تشغلها عندئذ الثقوب بدلا من الالكترونات .

وقد سميت هذه الذرات مثل ذرة البورون « اللصة » باسم المستقبلات (acceptors) . اما مستويات الثقوب المناظرة لها فسميت باسم مستويات المستقبلات (شكل ٢٠) .

وهكذا يكون لدينا نوعان من التوصيل الكهربائى فى هذه العناصر وهما : بواسطة الالكترونات او بواسطة الثقوب ، وذلك بالاستناد الى نوع الذرات التى اتخذت مكانها فى الشبكة سواء اكانت جرمانيوم او سيليكون .

ونرجو القارىء مرة اخرى ان يتصور بان الثقب افتراضى فحسب ، وهو يمثل حركة الالكترون . ويمكن القول بان الثقب يصور الالكترون الذى يقفز فى منطقة التكافؤ المليئة بين ذرة واخرى مثل حيوان الكنغر . وعندئذ فان الالكترون يشبه فى حركته بمنطقة التوصيل بدرجة اكبر حركة العداء الذى ينتقل هناك بصورة انسيابية ، بخطوات قصيرة وسريعة . وقد ذكرنا اعلاه بان مستويات الالكترونات فى منطقة التوصيل تنفصل ايضا الواحدة عن الاخرى . لكن المسافات فيما بين المستويات تكون ضئيلة الى درجة بحيث انها تندمج عمليا مع بعضها البعض .

ولنعد الى حديثنا . فلنحاول ان نضيف الى الجرمانيوم ذرات البورون والزرنيخ . فما هو نوع الموصلية الكهربائية التى تتولد عندئذ فى الجرمانيوم ؟ من الواضح ان ذلك يتوقف على النسبة بين عدد ذرات الشائبتين . فاذا ما كان عدد ذرات الزرنيخ اكبر ، فان موصليته تكون الكترونية ، واذا ما كان العكس فان الموصلية تكون ثقبية .

ولكن ما الحاجة الى كل ذلك ؟ لقد ظهر بان النسبة بين نوعى التوصيل ذات اهمية كبيرة فى استخدام اشباه الموصلات . ويعود

كل ذلك الى الاختلاف فى « خفة » التيار الناجم عن حركة الالكترونات والثقوب .

وتستطيع اشباه الموصلات ذات الشوائب « المزدوجة » ان تحصر التيارات فى اتجاه واحد ، بينما تمررها بشكل جيد فى الاتجاه المعاكس . وبتعبير آخر ان اشباه الموصلات يمكن ان تؤدى دور المقومات (rectifiers) .

وهى قادرة على تحويل الفلطية الصغيرة الى فلطية عالية ، وذلك بفضل قابليتها على التحكم بمقاومتها ايضا . وهذا يعنى بان أشباه الموصلات تستطيع ان تقوم بدور مضخمات (amplifiers).

ونظرا لكون اشباه الموصلات صغيرة فى الحجم ومدمجة و بسيطة واقتصادية ومضمونة فى العمل ، فانه يفضل استعمالها على الصمامات الالكترونية البائسة .

وعندما تدخل الفوتونات اشباه الموصلات فانها تطرد فيها الالكترونات من منطقة التكافؤ الى منطقة التوصيل . وعند اضاءه شبه الموصل ينبعث منه تيار كهربائي . وهذا يعنى بان اشباه الموصلات تستطيع تحويل الطاقة الضوئية الى كهربائية مباشرة بل وهى تقوم بذلك الآن بصورة اكثر فعالية من الفلزات .

وقام العلماء السوفييت وعلى رأسهم أ . يوفه بدور بارز فى صنع هذه الاجهزة الممتازة .

فتقوم البطاريات السيليكونية مثلا بتحويل أشعة الشمس

المحرقة فى الصحراء الى تيار كهربائى ، يعمل على تدوير الموتورات فى شبكات الرى، التى تحمل المياه الى المناطق المجدبة من الارض. وهكذا أجبر الانسان الشمس على العمل ضد نفسها ! وتعمل البطاريات الكهربائية لاشباه الموصلات على متن الصواريخ الكونية والاقمار الصناعية التى تدور حول الارض .

كما تحول اشباه الموصلات الطاقة الحرارية الى تيار كهربائى مباشرة . واصبحت عديمة النفع تلك المحطات البخارية لتوليد الطاقة الكهربائية التى تقوم الحرارة فيها بتحويل الماء الى بخار ، ثم يحرك البخار التوربين المتصل بالعضو الدوار للمولد . وسيأتى اليوم الذى تمحى مثل هذه الاجهزة من على وجه البسيطة . اما الآن فتعمل أشباه الموصلات بنجاح كمولدات كهروحرارية تحول حرارة مصابيح الكيروسين الى تيار كهربائى ، وكمبردات او ثلاجات ليس فيها اى جزء متحرك .

وهذه هى البداية فقط . فامامنا تنبسط آفاق المستقبل النير الذى ينتظر هذه البلورات العجيبة .

فى أعماق نواة الذرة

عند العتبة

الذرة والجزيء والبلورة ... وماذا سيأتى بعدها ؟

ان على ميكانيكا الكـّم الآن ان تقوم بمسيرة شاقة الى اعماق الذرات ، حيث تكمن نوى الذرات التى هى أصغر منها كثيرا فى الحجم. ويجب عليها ايضا ان تتغلغل الى اعماق عالم أعجب وأغرب .

ولم يكن احد من الفيزيائيين فى العشرينيات يتصور ما سيقود اليه هذا البحث . وكانت تدفعهم الرغبة البسيطة فى استكناه المجهول فحسب ، مع شيء من الفضول .

ولدى نواة الذرة الكثير لتقدمه الى محبى المعرفة. وعندما كانت ميكانيكا الكم تحتفل بانتصاراتها الاولى على عالم الذرات ، فانه لم يعرف أحد شيئا عن عالم نوى الذرات تقريبا .

ان العلم يعرف بعض الشيء عن النوى . وعليه ان يبدأ بحثه من هذه المعرفة بالذات .

ففى نهاية القرن التاسع عشر اكتشف العالم الفرنسى بيكيريل (Becquerel) صدفة بان لبعض المواد القدرة على التأثير فى

اللوح الفوتوغرافي . ووجدت ماري سكلودوفسكايا (Marie Sklodowska) وبيير كوري (P. Curie) ، اعتمادا على الاكتشاف المذكور ، بان هناك ثلاثة عناصر تتميز بهذه الصفة ، وهي من العناصر الكيميائية الواقعة في نهاية الجدول الدوري للعناصر لمندلييف ، وهي الراديو والبولونيوم والاورانيوم .

واطلقت على الظاهرة الجديدة تسمية النشاط الاشعاعي (radioactivity) . واصابت النظريون آنذاك حيرة كبرى لانهم لم يستطيعوا تفسير هذه الظاهرة اعتمادا على قوانين الفيزياء الكلاسيكية . وتم الحصول بواسطة التجربة على حقائق جديدة عن النشاط الاشعاعي الغامض . فظهر بانه يتألف من ثلاثة انواع من الاشعاعات وهي : الفا وبيتا وجاما .

وقد ظهر بان اشعة الفا تتكون من جسيمات ذات شحنة موجبة . وتبلغ شحنتها ضعف شحنة الالكترون في المقدار ، اما كتلتها فهي اربعة أمثال كتلة ذرة الايدروجين تقريبا . ولا تتميز أشعة بيتا عن الالكترونات في شيء . اما أشعة جاما فهي اشعة كهرومغناطيسية شديدة النفاذية (hard) ، كما يقول الفيزيائيون . وان قابليتها في الاختراق تزيد كثيرا عما تتميز به ، مثلا ، اشعة رونتجن (أكس) صاحبة الرقم القياسي في سعة اختراق الاشياء .

وبعد مضي سنوات قلائل وضع العالم الفيزيائي الانجليزي رذرفورد سوية مع تلميذه بوهر النموذج الكوكبي للذرة ، الذي تدور

فيه الالكترونات ، مثل الكواكب ، حول « شمسها » أى نواة الذرة . واتضح شيئا فشيئا ان مسبب النشاط الاشعاعى (الفاعلية الاشعاعية) هو الذرة بالذات .

اما بخصوص جسيمات ألفا فان ذلك كان واضحا منذ البداية: فليس هناك مكان لها فى الذرة سوى النواة التى تتركز بها فى الواقع جميع كتلة الذرة . ومن ناحية اخرى فان الالكترونات تتواجد فى قشرات الذرة . وغالبا ما تتطاير منها الالكترونات التى هى كمات الطاقة الكهرومغناطيسية . فهل يمكن ان تتولد اشعة بيتا واشعة جاما فى قشرة الذرة بالذات ؟

كلا ، لقد ظهر بان ذلك فى حكم المستحيل . فعند انبعاث اشعة بيتا لا تتأين الذرة ، ولا تكتسب شحنة كهربائية . وهذا يعنى بان قشرة الالكترونات تبقى سليمة ولا يطرأ عليها اى تغير . والاكثر من ذلك ان حسابات الطاقة التى تناظر فوتونات الضوء المرئى وأشعة رونتجن (أكس) ترتبط بالقفزات فى قشرات الالكترونات ، قد بينت بانها تنقص بمرات عديدة عن طاقة فوتونات أشعة جاما . وهكذا تتوطد الفكرة بان نواة الذرة هى التى تسبب هذين النوعين من الاشعاعات ذات الفاعلية الاشعاعية (radioactive radiation).

ومرت بضعة أعوام اخرى ثم قدم رذرفورد للفيزيائيين النظريين مادة جديدة للتأمل . فوضع فى طريق أشعة ألفا المنبعثة من الراديو اناءا يحتوى على النتروجين النقى وبعد مرور فترة من الوقت وجد

فيه ... الاوكسجين ! وبذلك تحقق حلم الكيميائيين فى قديم الزمان : اذ تم الحصول على عنصر كيمياوى من عنصر آخر ! صحيح ان ذلك تم بطرق غير كيمياوية مطلقا .

وفى العام نفسه ، وبينما كان رذرفورد يراقب أول تحول للذرة ، اتضح بان نوى ذرات العنصر الكيمياوى الواحد قد تكون ذات كتل مختلفة . وقد بينت الحسابات بان هذه الكتل تتميز احداها عن الاخرى بمقدار هو مضاعفات كتلة ذرة الايدروجين او قريبا منها جدا . وأطلق على هذه النوى اسم النظائر (isotopes) .

الخطوة الاولى

الفاعلية الاشعاعية ، تحول النوى المتبادل ، النظائر ...

ويبدو بانه الممكن الآن القيام بالخطوة الاولى فى وضع نظرية حول نواة الذرة . فلدينا الحقائق الاولية ، كما ان ميكانيكا الكم التى اثبتت قوتها موجودة ايضا .

لكن الفيزيائيين النظريين لا يبدون اية عجلة فى الامر . وهم يواصلون الوقوف فى مشارف غابة عذراء ، فيلتقطون اصواتها وروائحها غير انهم يخافون الدخول اليها . وكانوا يعتقدون بان الوقت لا يزال مبكرا لترك «العربة الذاتية الحركة» لميكانيكا الكم ، تجابه كل صعوبات الطريق لوحدها .

فطلبوا من الفيزيائيين الذين يقومون بالتجارب ان يفتحوا فى

هذه الغابة العذراء ولو دربا صغيرا يمكن ان تسير فيه هذه « العربة ذاتية الحركة » . ولم ينتظر هؤلاء طويلا اذ سرعان ما اكتشف الفيزيائى الانجليزى تشادويك (Chadwick) ، فى عام ١٩٣٢ ، النيوترون .

والآن يمكن البدء بالسير .

وقبل ذلك كانت مسألة اساسية غير واضحة وهى من اى الجسيمات تتألف نواة الذرة . وان حقيقة كون النواة مركبة كانت معروفة منذ زمن طويل ، وليتذكر القارىء الفاعلية الاشعاعية عندما تنبعث من النوى الجسيمات ، بينما تواصل النوى نفسها البقاء . وبالمناسبة فانه كان قد ثبت وجود احدى جسيمات النواة وهى البروتون.

ويمكننا الآن اعتبار الذرة مؤلفة من الجسيمات التى يعثر عليها لدى تفتتها فى الفاعلية الاشعاعية ، من جسيمات ألفا والكترونات . لكن هذا الافتراض لا ينفع فى شىء . فان جسيمات ألفا لا تختلف فى صفاتها بشىء عن نوى الهيليوم . وبالمناسبة توجد نوى أخف بكثير وهى نوى الايدروجين . وهذا يعنى بان نواة الايدروجين — البروتون — يجب ان تكون أصغر لبنة فى صرح النواة . وهى ابسط النوى ، لذلك اطلقت عليها التسمية اليونانية البروتون .

والآن يمكننا البدء ببناء نموذجنا للنواة . ويجب عندئذ الالتزام بالقاعدة الاساسية وهى ان شحنة النواة يجب ان تساوى فى المقدار مجموع شحنات كافة الالكترونات فى قشرة الذرة ، ولكن باشارة معاكسة

(موجبة) . ولهذا فان الذرة عموما تكون متعادلة . وبالاضافة الى ذلك فنحن نعلم كتل النوى ، وهى تساوى تقريبا كتل الذرات المناظرة لها بعد طرح كتل القشرات الالكترونية .

وهكذا فلدينا الفرضية الاولية وهى ان النوى تتألف من بروتونات والكترونات . ويوجد فى نواة الايدروجين بروتون واحد ، وتنعدم الالكترونات نهائيا . اما فى نواة الهيليوم فتوجد ٤ بروتونات والكترونان . وفى النتيجة فان شحنتها هى + ٤ – ٢ = + ٢ ، وتزيد كتلتها قليلا على اربعة اضعاف كتلة الايدروجين . فالمعروف ان الالكترون عديم الوزن تقريبا بالقياس مع البروتون ، فهو اخف منه بألفى مرة !

ولنواصل فرضيتنا . ان كتلة نواة الليثيوم هى ٧ وشحنتها + ٣ ، وتتألف هذه النواة من ٧ بروتونات و ٤ الكترونات ، وكتلة نواة البورون ١١ وشحنتها + ٥ ، وتتألف من ١١ بروتونا و٦ الكترونات ونواة النتروجين (١٤ و +٧ على التوالى) تتألف من ١٤ بروتونا و ٧ الكترونات ، ونواة الاوكسجين (١٦ و +٨) تتألف من ١٦ بروتونا و ٨ الكترونات وهكذا دواليك .

ويبدو ان عملية بناء النواة تجرى على خير ما يرام . الا ان الطبيعة توجه لها ضربة جانبية على حين غرة ، اعتمادا على « هكذا دواليك » . والحقيقة ان كل شىء يسير على ما يرام بالنسبة للابنية الصغيرة جدا ، اى النوى الخفيفة . ولكننا عندما ندخل قطاع الابنية المتوسطة والضخمة ، نجد ان الاتفاق يتحطم شيئا فشيئا . فانظروا

بانفسكم. فان الحديد الذى كتلة نواته (سنسميها فى المستقبل، بدقة اكبر ، بعدد كتلة النواة ، لانه يبين بكم مرة تزيد كتلة النواة على كتلة البروتون) ٥٦ وشحنتها +٢٦ يتطلب ٥٦ بروتونا و ٣٠ الكترونا ، وعدد كتلة نواة اليورانيوم ٢٣٨ وشحنتها +٩٢ يتطلب ٢٣٨ بروتونا و ١٤٦ الكترونا .

ونستنتج من ذلك بان الطبيعة تضع فى كل نواة جديدة لا بروتونا واحدا كما كان المتوقع بل عدة بروتونات رأسا . واذا ما انكرنا الفكرة فستبرز امامنا المتاعب بشأن الكتل والشحنات للنواة . ونتيجة لذلك يزول النظام فى بناء الذرة . وعندئذ تبرز امامنا صعوبة ادراك كيفية نشوء النظائر . كما وتبرز امامنا حقا المصاعب ، فى طريقتنا فى بناء النوى !

نعم ، هذه هى حقيقة الامر . فكما هو واضح ان الالكترونات فى الذرة يجب ان لا تكتفى بان « تقرب » شحنة النواة الى المقدار الذى لاحظناه فى التجربة . فلديها وظيفة اكثر اهمية من ذلك . ان البروتونات المشحونة بجسيمات متماثلة ، يخاصم احدها الآخر كما هو الحال فى الالكترونات عند وجودها فى القشرات . ولمنع تطايرها يجب ربط كل بروتون بالآخر بسلسلة تجذبها نحو الالكترونات .

ويظهر الحساب البسيط بانه يجب ان تتوفر فى النواة لهذا الغرض كمية اكبر من « الاسمنت » الالكترونى مما نحصل عليه

بطريقتنا فى البناء . وهناك اعتراضات اخرى اكثر اقناعا على وجود الالكترونات فى النوى . وسنتحدث عنها بالتفصيل فيما بعد .

ومع ذلك فان الفيزياثيين النظريين كانوا يميلون الى التشكك فى كون النوى تتألف من بروتونات والكترونات . وبعد ذلك ظهر النيوترون . فأخذت قرائح العلماء تعمل بسرعة : فطرح الفيزيائى المعروف فيرنير هيسنبرج والفيزيائيان السوفييتيان د . ايفانينكو وى . تام فى عام ١٩٣٢ نفسه فرضية قوية، ومدعمة بالحسابات الرياضية ، تقول بان النوى تتألف من بروتونات ونيوترونات فحسب . وهكذا تمت الخطوة الاولى .

الخطوة الثانية

لقد ظهر بان الطبيعة كانت تلتزم الاقتصاد لدى بناء نوى الذرة بنفس القدر لدى بنائها القشرات الالكترونية للذرة . الا انها تستخدم فى هذه الحالة نوعين من الطوب ــ البروتونات والنيوترونات .

وفى كل مرة يضاف فيها الى الذرة بروتون جديد ، فان الطبيعة تعمل جهدها من أجل عدم تطاير النواة تحت تأثير قوى النفور المتبادل بين البروتونات . ويكون عدد البروتونات والنيوترونات فى النوى الخفيفة (فوق الكالسيوم ، رقم ٢٠ ، تقريبا) واحدا تقريبا . وبعد ذلك يزداد عدد النيوترونات بصورة اسرع من البروتونات ، ويستمر ذلك ، فكلما ابتعدت اكثر ، كلما ازداد عددها بدرجة اكبر .

ففى نواة اليورانيوم التى عددها الكتلى ٢٣٨ يكون عدد البروتونات ٩٢ مقابل ١٤٦ نيوترون .

وبعد الوثوق من صمود البناء النووى بدأت الطبيعة فى تنويع الطراز المعمارى فيه فتضيف نيوترونا هنا وتحذف آخر هناك .
وهكذا نجد بان لكثير من النوى عدة نظائر . وتوجد احيانا نوى كثيرة الاشكال مثل نواة القصدير التى لها عشرات النظائر الثابتة .

ويمكننا ان نرى بسهولة بان فرضية هيسنبرج وايفانينكو تتفق بشكل رائع مع المعطيات حول كتل وشحنات النوى . فبموجب هذه الفرضية تتألف نواة الايدروجين من بروتون واحد فقط ، ونواة الهيليوم التى عددها الكتلى ٤ (هيليوم — ٤) من بروتونين ونيوترونين ، ونواة الليثيوم — ٧ من ٣ بروتونات و ٤ نيوترونات ، والبورون — ١١ من ٥ بروتونات و ٦ نيوترونات ، والنتروجين — ١٤ من ٧ بروتونات و ٧ نيوترونات، والاوكسجين — ١٦ من ٨ بروتونات و ٨ نيوترونات وهكذا دواليك .

لكن ليس هناك أدنى شك الآن فى « هكذا دواليك » هذه !

ماذا نعرف عن النيوترون ؟ انه جسيم كتلته تساوى كتلة البروتون تقريبا ، وتنعدم فيه اية شحنات كهربائية . والنيوترون اسم على مسمى فهو متعادل (محايد) كهربائيا .

فعلى اى اساس اذن يشغل فى النواة مكانة لم تمنح للالكترون ؟ فهذا مثلا كان يستطيع القيام بوظيفة هامة هى ربط البروتونات

المتنافرة فى النواة ، ومنعها من التطاير . فكيف يستطيع القيام بذلك النيوترون العديم الشحنة ؟

وعندئذ يتضح بان قوى الجذب الكهربائية لا تكفى لشرح ثبات النوى . فالنوى بندقات يصعب كسرها حقا . وفشلت جميع المحاولات لتحطيم النواة بالطرق الكيمياوية ، وباستخدام الضغوط ودرجات الحرارة العالية ، والمجالات الكهربائية الهائلة ، اى ترسانة السلاح التى استخدمت بنجاح ضد القشرات الالكترونية للذرة .

ويستنتج الفيزيائيون بان معنى ذلك ان النيوترون لم يوجد فى النواة عبثا. فهو بالذات يجب ان يقوم بدور الاسمنت الذى يربط البروتونات فى وحدة واحدة .

ولكن باية قوى ؟ من الواضح انها يجب ان لا تكون كهربائية ، لان النيوترون متعادل الشحنة .

ويجهد النظريون قرائحهم من جديد . وبعد مرور ثلاثة اعوام على اكتشاف النيوترون لمعت فكرة نيرة فى حلّ هذه المعضلة . اذ اورد الفيزيائى اليابانى يوكاوا (Yukawa) فكرة تقول بانه توجد بين البروتونات والنيوترونات قوى جاذبية نووية خاصة تبادلية وكبيرة .

القوى التبادلية ؟ انه اصطلاح مألوف بالنسبة لنا . فهى التى تربط ما بين ذرتى الايدروجين والنتروجين والاوكسجين وكثير من العناصر الاخرى بشكل جزيئات ثابتة جدا . وتتبادل الذرات

الكتروناتها فى هذه الجزيئات باستمرار ، مما يجذب الذرات بعضها نحو البعض الآخر .

ولكن ما هو شكل التبادل الذى يتم فى نواة الذرة ؟ فالبروتونات والنيوترونات جسيمات متغايرة . ولا توجد الكترونات فى النواة . فكيف يتم تبادل البروتون والنيوترون ؟

ان الفكرة التى اصطدمت بهذه الصعوبة كانت امام طريقين : فاما ان تتراجع ، وتعترف بان الفرضية الاولية حول التبادل غير صحيحة ، واما ان تقوم بقفزة جريئة جدا ، فتعترف ، رغم عدم تطابق البروتون والنيوترون ظاهريا ، بان هذين الجسيمين غير مختلفين تماما ، وان لهما طبيعة مشتركة . وبما ان المسألة كذلك فانهما يستطيعان التحول فيما بينهما من بروتون الى نيوترون ، ومن نيوترون الى بروتون !

والحقيقة ان هذه الفكرة هى فى منتهى الجرأة . ففى عام ١٩٣٥ ، وعندما طرح يوكاوا فرضيته ، لم تكن قد كشفت بعد ظاهرة التحول التبادلى للجسيمات البسيطة المكونة للمادة ، فى اى مكان . والحق انه جرى قبل ذلك بثلاثة اعوام اثبات تحول الالكترون والبوزترون الى فوتونات أشعة جاما . لكن هذه الظاهرة ذات طبيعة مغايرة تماما .

ولنواصل افكارنا حول الموضوع . فاذا ما تحول جسيمان الى بعضهما البعض فيجب ان يتبادلا شيئا ما اثناء هذه العملية .

فيأخذ البروتون هذا « الشيء » ويحوله الى نيوترون . بينما يتخذ النيوترون لدى فقدانه هذا « الشيء » شكل البروتون . ومفهوم انه يمكن ان يتم مع ذلك سوية تبادل معاكس ، عندما يكتسب النيوترون هذا « شيء » بينما يفقده البروتون .

وقدم يوكاوا صورة لهذا الجسيم المادى ، او « شيء » ، انطلاقا من حقيقة الثبات الكبير للنوى ، وكذلك من ملاحظة ان قوى التبادل بين البروتون والنيوترون يجب ان تؤثر فقط على مسافات قصيرة جدا بينهما — لذلك فليس من الغرابة ان تكون النوى بهذه الضآلة فى الحجم ! وهذا « الشيء » او الجسيم المادى يمكن ان يحمل شحنة موجبة او سالبة ، ويساوى مقدارها مقدار شحنة البروتون (او الالكترون) ، وتكون كتلتها اكبر من كتلة الالكترون بـ ٢٠٠ — ٣٠٠ مرة تقريبا .

ان البروتون والنيوترون اكبر من الالكترون فى الكتلة بحوالى ١٨٠٠ مرة تقريبا . ويقع الجسيم الغامض بكتلته فى مكان وسط بينهما . لذا اطلقت عليه تسمية الميزون (وهى من كلمة « ميزوس » اليونانية التى تعنى « متوسط ») .

وبذلك فان صورة التبادل النووى تأخذ الشكل التالى : عندما يبتعث البروتون ميزونا موجبا ، فانه يجب ان يفقد معه شحنته الكهربائية ويتحول الى نيوترون . اما النيوترون الذى يستقبل هذا الميزون فيتحول نفسه الى بروتون . وبالعكس ، فيستطيع النيوترون

ابتعاث ميزون سالب ويتحول الى بروتون بطريقة أخرى . اما هذا الميزون ، الذى يسقط فى أسر البروتون ، فانه يتحول الى نيوترون بطريقة اخرى .

البحث عن الميزون الغامض

ولكن اين هى هذه الميزونات ؟ وجرت من جديد دراسة التجارب حول النوى ذات الفعالية الاشعاعية . وكان الجواب سالبا بصورة قاطعة : وحتى لو وجدت الميزونات فى النوى فانها سوف لن تتطاير من هناك . كما لو ان الميزونات تفضل اداء واجبها الهام بتواضع دون ان تظهر امام عيون الناس .

وعندئذ توجه الفيزيائيون الى المصدر العظيم للمعلومات حول الجسيمات النووية ، الذى هو الاشعة الكونية . ولم يمض عام على ذلك حتى عثر فيها على الميزون ! وكانت كتلته وفق حسابات يوكاوا تزيد على كتلة الالكترون بمقدار ٢٠٧ مرات .

وكان بمقدرة الفيزيائيين النظريين الاحتفال بهذا النصر الكبير ، ولم لا ، بعد الفكرة العظيمة الجرأة حول التقارب بين البروتون والنيوترون واكتشاف الميزون فوق رأس قلم الرصاص ! ان هذا الاكتشاف من اعظم النجاحات التى حققتها الفيزياء فى تاريخها باجمعه !

ولكن ظهر بان الفرحة كانت سابقة لاوانها . اذ امتنع الميزون عن الاتصال الوثيق بنوى الذرات ، وأبدى تجاهله التام للنيوترونات ،

بينما اكتفى « بانحناءة » بسيطة للبروتونات فى اطار التأثير الكهربائى المتبادل الاعتيادى . واخذ الفيزيائيون يسألون بعضهم البعض : فهل هذا هو الجسيم الذى يجب ان يذهب الى ما بين البروتون والنيوترون وان يتبادل الفعل معهما بنشاط كبير وباقصى اشكال « عدم اللياقة » ؟ وكان جوابهم القاطع وبالاجماع : كلا ، ان « فلتة » الطبيعة هذا ليس الجسيم المطلوب . ويجب مواصلة البحث .

وفى هذه المرة ماطلت الطبيعة العلماء وقتا طويلا . وقد تحققت اكتشافات باهرة فى بناء النواة ، وعرف سر انبعاث الطاقة النووية ، وصنعت اولى المفاعلات والقنابل الذرية ، ومع ذلك فقد بقى الجسيم المنتظر مختفيا . ولم يتسن « الامساك » به دون افلات الا فى عام ١٩٤٨ من قبل الباحث الشهير فى حقل الاشعة الكونية باول (Powell).

وكان هذا الجسيم ميزونا ايضا لكنه من نوع آخر فهو اكبر من الالكترون فى الكتلة بمقدار ٢٧٣ مرة بدلا من ٢٠٧ مرات . ولم يكن هناك احتمال للخطأ هذه المرة . ويتبادل الميزون الجديد الفعل (وقد سمى باسم ميزون — باى تمييزا له عن الميزون « الخامل » المسمى بميزون — ميو) مع الجسيمات النووية بنشاط كبير . وفى الحالات التى كانت له فيها طاقة كافية للتحليق استطاع تحطيم الذرة التى صادفته فى طريقه !

وهكذا ثبتت باروع شكل فرضية ميكانيكا الكمّ القائلة بان سبب القوى النووية لا بد وان يعود الى التبادل الميزونى بين البروتونات

والنيوترونات . وكان الفيزيائيون واثقين من صحة هذه الفرضية الى درجة كبيرة حدت بهم لمواصلة السير فى اعماق « الغابة » الذرية الكثيفة ، دون ان يمتلكوا ادلة قاطعة حول وجود الميزون « المطلوب » . ان المحقق المؤمن دونما شك بحقيقة فرضياته وتنبؤاته يسير قدما من أجل الكشف عن الجريمة ، وستكون مكافأته تلك الادلة القاطعة التي ستظهر كالمعجزة فى آخر ايام التحقيق . وكان اكتشاف الفيزيائيين النظريين ، ولو فى وقت متأخر نوعا ، لميزون ـ باى بمثابة مكافأة على جرأتهم فى التفكير .

اعظم القوى على وجه البسيطة

عكف الفيزيائيون بنشاط على دراسة القوى النووية التى تم اكتشافها . وكان اول ما كشفوه هو ضآلة مجال تأثيرها ، وهو ما أشرنا اليه من قبل . وتبدأ القوى التبادلية فى الجزيئات عملها عندما تكون المسافات بين الذرات بقدر مقاييس حجوم الذرات نفسها اى فى حدود اجزاء المائة مليون من السنتيمتر . وان القوى التبادلية للنواة هى اقصر فى الفعل بعشرات آلاف المرات . ولا يمكن اكتشافها عمليا الا على مسافات مقاييس حجوم الجزيئات نفسها . لذلك فمن الطبيعى ان تتواجد عمليا داخل النوى فقط ، ولا تظهر خارجها .

ان القوى النووية هى من اكثر القوى التى عرفها الانسان

حتى يومنا هذا جبروتا . فهى لا تقضى تماما على التنافر المتبادل بين البروتونات فحسب ، وهو كبير جدا فى هذه المسافات الضئيلة ، بل وتربطها معها فى أسرة وطيدة جدا (تركيب ثابت) .

فما الذى يميز ثبات النوى ؟ يعتمد الفيزيائيون فى تفسير ذلك على مفهوم عام واحد ينطبق على جميع الاجسام والجزيئات والذرات وكذلك النوى ، وهو مفهوم طاقة الترابط او الطاقة المقيدة (binding energy) . وهى الطاقة التى يجب اكسابها لمجموعة ما من الجسيمات من أجل تفتيتها الى الجسيمات الحرّة المكونة لها .

ومن المفهوم انه كلما اتحد عدد اكبر من الجسيمات فى المجموعة فان الطاقة اللازمة تكون اكبر . لذلك تؤخذ عادة لقياس الثبات طاقة الترابط لجسيم واحد . وتؤخذ فى غالب الاحيان وحدات خاصة فى القياس هى الالكترون ـ فولت للتعبير عن هذه الطاقة . ويكتسب الالكترون هذه الطاقة ، لدى مروره فى مجال للطاقة الكهربائية ، فرقا فى الجهد يبلغ فولتا واحدا. وتعتبر هذه الوحدة صغيرة جدا بالنسبة لعالم الاشياء الكبيرة ، لكنها بالنسبة لعالم الذرة ملائمة تماما .

ان الروابط (القيود) بين جزيئات كثير من المواد تتحطم فى درجة الحرارة الاعتيادية (فى الغرفة) . لذلك فان هذه المواد توجد بشكل غاز فى الظروف الاعتيادية . وتكون طاقة الترابط بين هذه

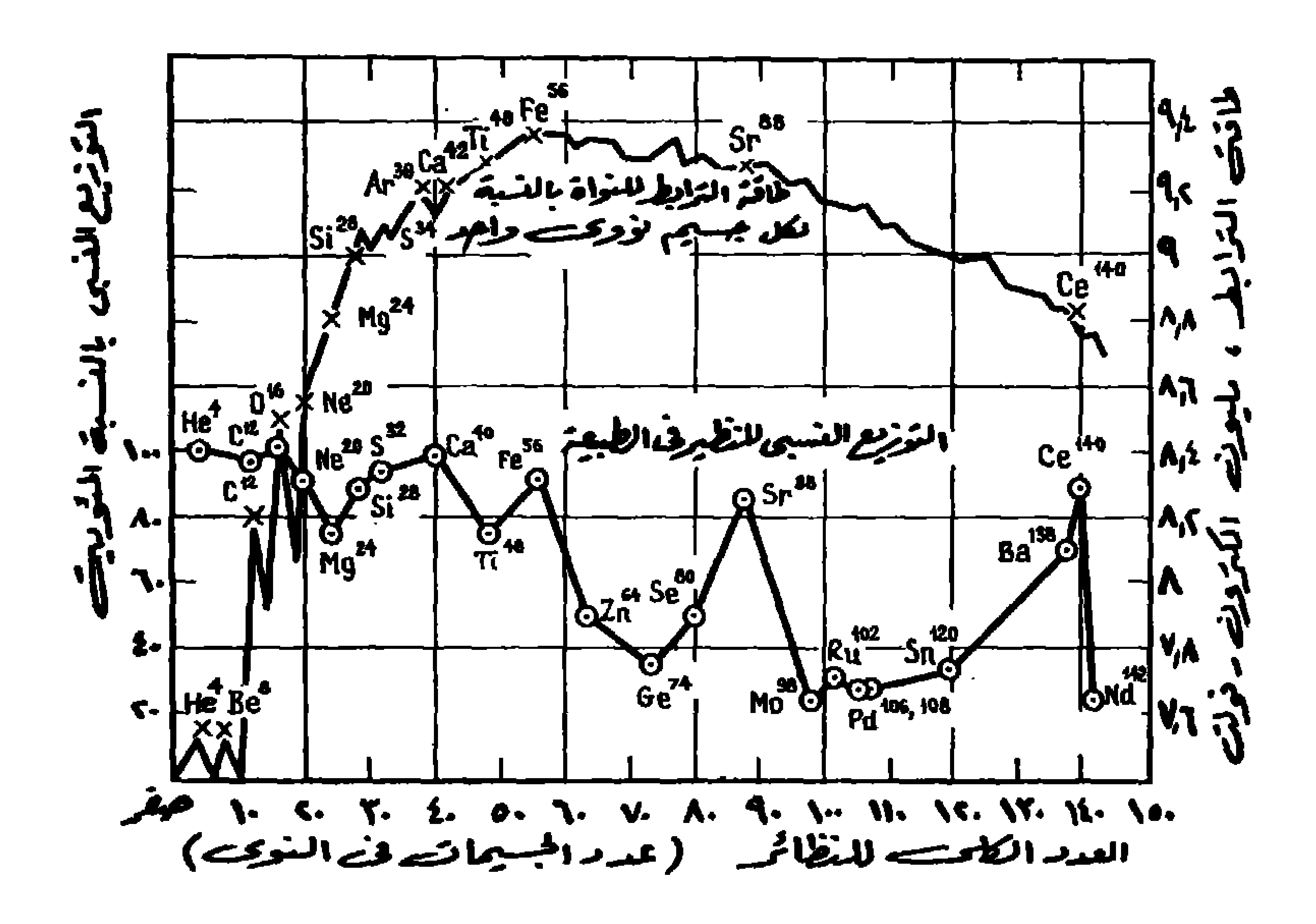
الجزيئات فى حدود جزء من المئة من الالكترون ـ فولت للجزىء الواحد .

ويتطلب تحطيم الجزيئات نفسها الى ذرات منفصلة الى طاقة اكبر ، تبلغ عشر الالكترون ـ فولت للذرة الواحدة . وهذا المقدار يطابق درجات الحرارة المسلطة بآلاف وعشرات آلاف الدرجات .

اما تحطيم الذرات الى الكترونات ونواة « عارية » فهو أمر فى غاية الصعوبة . ونحن نعلم بان لالكترونات الذرة طاقات مختلفة تناظر روابطها مع النوى . ويتراوح مجال هذه الطاقات بين عشرات وآلاف الالكترون ـ فولت .

وتبلغ طاقة الترابط للجسيمات النووية ملايين الالكترون ـ فولت! ويتضح لنا الآن لماذا لا تؤثر على النوى ابدا اكبر القوى غير النووية : لانها ضعيفة للغاية ! فاذا ما جرى تصادم نواتين بسرعتى الحركة الحرارية فى درجة حرارة تبلغ آلاف درجة مئوية ، فان التأثير سوف لا يزيد عما لو اصطدمت كرة من المطاط بجدار من الجرانيت .

وعندما درس الفيزيائيون عمل « المهندس المعمارى النووى » فانهم حددوا ثبات مختلف اشكال النوى ، ورسموها فى رسم بيانى بحسب العدد الكتلى للنواة . ولننظر الآن الى الرسم البيانى . فسنجد ، اولا ، بانه « مسنن » فى الشكل . ويشبه المنحنى فيه تعرجات قمم



شكل ٢١

الجبال . ومما يعمق التشابه بين الصورتين هو ان قمم المنحنى تبدو للوهلة الاولى وكأنها غير منتظمة تماما .

ولكن قبل ان نواصل الحديث لنلقى نظرة على الرسم البيانى الاسفل . وهو الرسم البيانى لتوزيع العناصر الكيمياوية فى الطبيعة . وقد التجأ الفيزيائيون عند وضعه الى طلب مساعدة الجيولوجيين وعلماء الفلك وحتى البيولوجيين ، فى ذلك . وقد ظهر بان توزيع العنصر يناظر « تواجد » نوى ذراته فى الطبيعة . وما يقصد بتعبير الطبيعة

هنا لا الارض فحسب ، بل الكون باجمعه .. واى مكان قد يبلغه الجيولوجى او يراه عالم الفلك باجهزة الطيف .

ولنجرى مقارنة بين هذين الرسمين البيانيين . فنلاحظ وجود صفات مشتركة بينهما .

فيمكن ، قبل كل شيء ، ملاحظة انه فى الجانب الايسر من كلا الرسمين تناظر اعلى « القمم » فى المنحنى العلوى نوى الهيليوم — ٤ والكربون — ١٢ والاوكسجين — ١٦ وغيرها . وجميع الاعداد الكتلية المذكورة هى من مضاعفات الاربعة ، كما لو ان هذه النوى لا تتألف من بروتونات ونيوترونات مختلفة ، بل من جسيمات — ألفا مباشرة . اما فى المنحنى السفلى فان هذه النوى تناظر اعلى توزيع نسبى لها فى الطبيعة ، وهى قريبة من نسبة ١٠٠ بالمئة .

واذا ما واصلنا رحلتنا فوق « قمم الجبال » فسنرى بان اكثر المرتفعات بروزا فى المنحنى العلوى تطابق القمم فى المنحنى السفلى . وكلما ازداد ثبات النوى ازداد انتشارها فى الطبيعة بشكل عام .

وسيؤدى ذلك بنا الى استنتاج ان الطبيعة تطبق قانون « الانتخاب الطبيعى » فى عالم نوى الذرات ايضا . فتبقى النوى الاكثر ثباتا ومتانة فقط . ومن اكثرها انتشارها تلك التى يساوى عدد النيوترونات والبروتونات فيها ٢ و ٨ و ٢٠ .. الخ . وسنعود مرة ثانية فيما بعد لشرح الظاهرة الاخيرة بصورة تفصيلية عند الحديث عن القشرات النووية .

ويمكننا ان نلاحظ هنا بان اعتبار النوى مؤلفة من جسيمات ــ الفا « مباشرة » شيء غير صحيح تماما . لكن هناك مسألة ثابتة قطعا وهي ان المجموعات المتكونة من زوج من النيوترونات وزوج من البروتونات هي مستقرة جدا حقا حتى في عالم نوى الذرات . ويرى الفيزيائيون بان القوى النووية المؤثرة بين مثل هذه العدد من الجسيمات تكون « مشبعة » . واذا ما حاولنا ضم بروتون او نيوترون اضافي آخر الى هذه المجموعة فان جميع محاولاتنا ستبوء بالفشل : فان نواة الهيليوم تمتنع عن قبول اى فرد آخر في اسرتها. والحقيقة ان هذه النواة هي من اكثر النوى عدم إقراء للضيف في الطبيعة : فلا توجد ابدا نوى عددها الكتلي يساوى ٥ (اى من بروتونين وثلاثة نيوترونات او من ثلاثة بروتونات ونيوترونين) .

لكن عائلة الهيليوم عندما لا تريد اقراء الضيف فانها توطد لحمتها . وفي الواقع ان نواة الهيليوم هي من اكثر النوى استقرارا في الطبيعة ، باستثناء نواة الايدروجين التي تتألف من بروتون واحد منفرد ولا تؤثر فيه اية قوى نووية .

ان الاشباع هي صفة جديدة تميز القوى النووية فحسب . كما ان صفتها في استقلال الشحنة تعتبر من الصفات الجديدة وغير العادية ايضا . ويعنى باستقلال الشحنة « تجاهل » القوى النووية للشحنة ، وهي تؤثر بنفس القوة بين البروتون والنيوترون وكذلك بين زوج من البروتونات وزوج من النيوترونات . ولم يدرك الفيزيائيون سبب ذلك حتى يومنا هذا .

مرة اخرى حول استقرار النوى

ان القوى التبادلية المؤدية الى تكون اكثر التراكيب النووية ثباتا هى قوى الجاذبية التى تربط بين البروتونات والنيوترونات . فالى اية درجة تستطيع هذه القوى تحقيق هذا الارتباط ؟ فلا بد من وجود حدود لها ، والا لاندمجت الجسيمات النووية فى بعضها البعض مكونة جسيما واحدا !

ومما لا شك فيه ان الطبيعة لا تسمح بحدوث ذلك فوضعت مقابل قوى الجاذبية النووية الجبارة قوى التنافر التى لا تقل عن الاولى قوة لدى اقتراب الجسيمات من بعضها البعض الى حد كبير . فلا تسمح للجسيمات باختراق بعضها البعض الآخر .

وهذا هو الحد الادنى لمجال تأثير القوى النووية . وقد تحدثنا فيما سبق عن الحدّ الاقصى لها . ويبدو انه يناظر اقصى مسافة يمكن اى تبتعد بها الجسيمات النووية عن بعضها من أجل ان يختبر مرة ثانية تأثير القوى النووية الكابح . ولهذا المجال نفس مقدار مقاييس حجم الجسيمات النووية نفسها .

ان هذه حقيقة هامة فعلا ! وهى التى يمكن ان تشرح لنا الاتجاه العام للرسم البيانى لطاقة الترابط : اذ تنخفض بازدياد العدد الكتلى للنوى . وفى الواقع ان كل جسيم ، فى النواة الخفيفة التى تضم عددا قليلا من البروتونات والنيوترونات، يمكن ان يرتبط بالجسيمات الباقية بواسطة القوى النووية .

ولكن ماذا عن الاشباع الذى ينّص على ان القوى النووية تفضل ربط اربعة جسيمات فقط ؟ الجواب على ذلك بسيط . ان الجسيمات النووية غير متميزة الواحدة عن الاخرى ، لذا فمن المستحيل فصل اربعة جسيمات معينة متميزة منها . فحاول مثلا فى بلورة ايونات الصوديوم والكلور فصل ازواج تناظر الجزيئات « السابقة » . ويمكن ان تدخل نفس ايونات الصوديوم والكلور فى الشبكة البلورية لملح الطعام فى مختلف الجزيئات « السابقة » NaCl . وهو ما ذكرناه سابقا .

ولكن عندما يكون عدد الجسيمات فى النواة اكبر فاكبر فان حجمها يصبح اكبر طبعا . والآن يمكن ان يرتبط كل جسيم بالقوى النووية مع الجسيمات المجاورة له فحسب . وتتولد بدلا من الرابطة « العامة » ما يشبه سلاسل من الروابط . وتبدأ النواة تدريجيا بفقدان ثباتها ، والادهى من ذلك فان هناك زيادة عامة فى القوى النووية المتضادة للتنافر فى البروتونات .

ان اضخم واثقل النوى الموجودة فى نهاية الجدول الدورى للعناصر تكون غير مستقرة جدا. وتضطرها الطبيعة نفسها لاتخاذ وضع اكثر ثباتا . ولا يتم ذلك الا عندما تتخلص النواة من الجسيمات النوية « الزائدة » فيها ، كما ترمى السفينة ثقل الموازنة لغرض الحفاظ على قابليتها للطفو . والجسيمات الزائدة التى ترميها النوى هى الاشعة ذات الفاعلية الاشعاعية .

وبالمناسبة ، وكما يعرف القارىء ، فهناك عدد كبير من النوى ذات الفاعلية الاشعاعية فى بداية ووسط الجدول الدورى للعناصر . ولكنها جميعا تقريبا ليست من صنع الطبيعة ، بل صنعتها يد الانسان . فيقنبل الفيزيائيون فى بداية الامر النوى الثابتة بالجسيمات النووية (وفى غالب الاحيان بواسطة النيوترونات) ، فيعكروا عليها حالة الاستقرار ، ويجعلوا هذه النوى فى حالة غير مستقرة ؛ بزيادة تحميلها بالجسيمات .

وتعود هذه الجسيمات الى حالة الاستقرار لا بنفس الطريق الذى سلكته لدى خروجها من تلك الحالة . كما ان حالة الاستقرار النهائية تختلف ، كقاعدة ، عن الحالة الابتدائية . وعند ما اخرجت النوى من حالة الاستقرار أخذت جوابا على ذلك برمى الالكترونات وفوتونات ـ جاما ، وتحولت الى نواة اخرى تماما .

ان اساس هذه الظاهرة التى سميت ايضا بظاهرة الفاعلية الاشعاعية الاصطناعية هو سعى النوى للثبات والاستقرار مهما كان الثمن . فالاشياء غير المستقرة لا يمكن ان تتواجد فى الطبيعة طويلا . ولنتذكر الرسم البيانى لتوزيع النوى فى الطبيعة . فهو يبين بوضوح بانه كلما كانت النواة اكثر استقرارا كلما طالت مدة بقائها، وهذا يعنى ازدياد انتشار العنصر المناظر فى الطبيعة .

انفاق فى النوى

ان القوانين التى تتحكم فى استقرار النوى معقدة جدا . ويقوم العلماء بدراستها منذ اكثر من ثلاثين عاما ، ومع ذلك فهى غير مفهومة حتى يومنا هذا . ومع ذلك فلدينا بعض المعلومات حول عدد من هذه القوانين . فلنتحدث عنها بالتفصيل .

وقد كشف القانون الاول سر الفاعلية الاشعاعية — ألفا او كما يقال عنها بانهيار — ألفا للنوى ، وذلك حتى قبل اكتشاف النيوترون . والحقيقة ان السر قد اكتشف ، اما الاسباب الكامنة فى اساس استقرار جسيم — الفا فلم تعرف بعد .

وهكذا فلا بد من توضيح مسألتين وهما : لماذا تتطاير جسيمات — ألفا من النواة ، ولماذا تتطاير هى بالذات وليس البروتونات والنيوترونات منعزلة .

ولنبدأ من المسألة الثانية الاكثر صعوبة . فعند دراستنا للرسم البيانى لطاقة الترابط تأكد لنا بان النوى المؤلفة من « الاربعات » (tetrads) ، ازواج البروتونات والنيوترونات (مثلا الهيليوم — ٤ ، والكربون — ١٢ ، والاوكسجين — ١٦) هى اكثر استقرارا من جاراتها فى الرسم البيانى. والآن نجد بان النوى الثقيلة ذات الفاعلية الاشعاعية تنحلّ بواسطة هذه الجسيمات الاربعة . فكيف نفسر هذا السلوك المزدوج لجسيمات — ألفا ؟

وتزداد الصعوبات امامنا اذا ما تذكرنا بان القوى النووية فى

الجسيمات الاربعة تبلغ حالة الاشباع ولا يمكن اضافة جسيم خامس الى الجسيمات الاربعة ـ فكيف توجد فى هذه الحالة نوى أثقل من نواة الهيليوم ؟

وللحصول على اجوبة على هذه الاسئلة يجب ان ندرس بشكل اكثر دقة وجود جسيمات ـ ألفا ، وكيفية اجراء تبادل الميزونات فيما بينها . ونحن نعرف بان احدى طرق التبادل الممكنة تتألف من عملية ابتعاث النيوترون لميزون ـ باى ذى شحنة سالبة ، فيتحول عندئذ الى بروتون، فيبتلع هذا الميزون ويتحول الى نيوترون بعد مضى فترة قليلة من الوقت .

وهكذا يوجد فى مجموعة الجسيمات الاربعة بمعدل وسطى بروتونان ونيوترونان . ولنتصور بان الميزون الذى ابتعثه النيوترون فى اربعة ما قد وقع فى أسر بروتون الاربعة المجاورة . وعندئذ يجرى فى آن واحد ارتكاب « جريمتين » وهى : وجود ثلاثة بروتونات ونيوترون واحد فى الاربعة الاولى ، اما فى الاربعة المجاورة فيكون الامر بالعكس اذ يوجد ثلاثة نيوترونات وبروتون واحد .

فلماذا يعتبر ذلك « جريمة » ؟ يقوم بدور الادعاء العام مبدأ باولى المعروف بالنسبة لنا . ولا تختلف البروتونات والنيوترونات فى لفها عن الالكترون ، لذا تطبق عليها كافة المحرمات بالنسبة للالكترون . لكن مبدأ باولى يمنع وجود اكثر من جسيم فى الاتجاه المذكور للف كما هو فى الحالة المذكورة .

ولهذا فان جسيم – ألفا مستقر جدا الى حد ان كل زوجين من البروتونات والنيوترونات يشغلان مستوى واحدا للطاقة ، وهو ادنى مستوى ممكن . ويجلس البروتونان فى مستوى واحد ، بينما يجلس على مثل هذا المستوى نيوترونان . وهذا ممكن لانه فى كل لحظة من الزمن يكتسب كل من البروتون والنيوترون فى الذرة شكلا مختلفا ، اى يمثل مع ذلك جسيمات مختلفة . فاذا ما كان فى المجموعة الرباعية (الاربعة) ثلاثة بروتونات ، فان احدها يجب ، اراد ذلك ام لم يرد ، ان ينتهك التحريم الصارم الذى وضعه باولى ، او ان يشغل مكانة ذات طاقة اكبر ، وبتعبير آخر ، ذات طاقة ترابط اصغر .

ان الجسيمات النووية لا ترغب فى ارتكاب «الجرائم» . كما انها لا تقبل ايضا بحالة عدم الاستقرار . فتعيد الميزون بسرعة ، وتبقى فيها من جديد الاربعتان الاعتياديتان . لكن التبادل السريع بين الاربعات لا يمر عبثا ، اذ يؤدى الى قيام ترابط متبادل بينها . وتصبح الاربعات اقل انعزالا عن بعضها البعض .

وكلما ابتعدنا عن النوى الخفيفة كلما ضعفت هذه التأثيرات على الاستقرار . لكن النواة الثقيلة تبدى تأثيرا واضحا بشكل حاد على المجموعة الرباعية . ويمكن للجسيمات فى محيط هذه النوى ان تبادل الفعل مع جاراتها القريبات فقط ، لان النواة اصبحت كبيرة جدا . ويبدو انه يجرى قرب سطح هذه النواة تكون مجموعات رباعية ايضا بالنظر لكونها من اكثر مجموعات الجسيمات استقرارا .

ولهذا السبب بالذات ، كما يبدو ، فانه لا تتطاير من النوى الثقيلة البروتونات او النيوترونات ، بل مجموعاتها الرباعية اى جسيمات ـ ألفا . ولكن كيف يمكنها ان تتطاير من النوى ؟ فالنواة هى نظام ارتباطى للجسيمات ، او كما سميناها سابقا ـ حفرة الجهد ، التى يفصلها عن الجسيمات المتواجدة بشكل حر" حاجز عال . كما ان عمق هذه الحفرة (او علو الحاجز) معلوم ايضا ، وهو يساوى طاقة الترابط .

وسنرى الآن كيف يختلف الحاجز النووى عما عرفناه من قبل فى انتفاء الحاجز لبذل اى جهد من اجل « القفز » عبره . والحاجز النووى ليس « درجة فى سلم » ذات « واجهة امامية » فقط ، بل هو كالسياج . وهذا « السياج » غير عريض لكنه عال جدا . وباختصار ان عرض الحاجز يتحدد بمجال تأثير القوى النووية ، اما العلو فهو الذى يحدد مقدار هذه القوى .

وتبدأ ميكانيكا الكم عملها هنا من جديد . فيكون خروج جسيمات ـ ألفا من النوى ذات الفاعلية الاشعاعية بمثابة تأثير النفق . وهو لا يختلف فى طبيعته عن تأثير النفق للالكترونات الخارجة من قطعة الفلز (المعدن) او الاختراق النفقى للالكترونات الى منطقة التوصيل فى اشباه الموصلات والعوازل . وفى الحالتين تبرز الصفات الموجية : مرة للالكترونات ، ومرة اخرى لجسيمات ـ ألفا .

ويصبح مفهوما الآن السلوك « الازدواجى » للمجموعات الرباعية

(الاربعات): اذ يتحدد كل شيء في عملها انطلاقا من الاحتمالات الكمية .

ويمكن نظريا اعتبار ان جسيمات ـ ألفا تنقذف من نواة الاوكسجين ايضا ، لكن احتمال حدوث ذلك ضعيف جدا . ويكون ارتفاع الحاجز اللازم لخروج جسيمات ـ ألفا في النوى الخفيفة كبير جدا (ان طاقة الترابط كبيرة) ، اما في النوى الثقيلة فان الحاجز واطئ (ان طاقة الترابط صغيرة جدا) . ويتوقف احتمال تأثير النفق الى حد كبير على علو الحاجز ، وينقص بسرعة بازدياده . وهنا يكمن سرّ المسألة كلها .

ومن الناحية الاخرى فان ارتفاع الحاجز اللازم لخروج جسيمات ـ ألفا في النوى الثقيلة اقل بكثير منه في حالة الخروج « الفردي » للبروتونات والنيوترونات. لذا فلا تخرج الا المجموعات الرباعية دون الجسيمات المنفردة .

هل تتألف النواة من قشرات ؟

تختلف النواة عن الذرة في كونها لا تحتوي على جسيم مركزي تحيط به مجموعات من السحب الالكترونية . وكان الفيزيائيون يتصورون النواة ، خلال عدة سنوات بعد اكتشاف التركيب البروتوني والنيوتروني للنواة ، بانها لا اكثر ولا أقل من مادة نووية مندمجة بشكل سحابات من البروتونات والنيوترونات .

الا ان اكتشاف ظاهرة اشباع القوى النووية وظاهرة انحلال — ألفا ، بين كما لو أن مادة النواة ليست عديمة الشكل تماما ، ويتحسس فيها وجود ما يشبه « الخلايا » الصغيرة ، اى جسيمات — ألفا . وبتوغل ميكانيكا الكم والتجارب فى اعماق « الغابة » النووية المجهولة اتضح شيئا فشيئا بان هناك مجموعات كاملة من الاشجار ، وانها ليست عديمة الشكل ، كما يبدو ذلك عن بعد عندما لا تشاهد اشجار متفرقة فيها .

ونحن نعلم بان المجموعة الرباعية للجسيمات تشغل اوطأ وضع للطاقة فى النواة وانها من اكثر الكتل النووية استقرارا . ويناظر هذا الوضع مستوى عاما مفردا للطاقة يحتوى على بروتونين ونيوترونين لهما لفان متعاكسان فى الاتجاه .

وتشغل المجموعة الرباعية الثانية من الجسيمات فى النواة المعطاة مستوى آخر للطاقة ، والثالثة مستوى ثالثا ، وهكذا . وبازدياد عدد المجموعات الرباعية للجسيمات ، تمتلئ مستويات الطاقة الاكثر علوا فى النواة وبشكل يشبه الى حد كبير بما يجرى للالكترونات فى الذرات .

لكن ليس جميع النوى تتألف من مجموعات رباعية ! وهذا صحيح . ومعنى ذلك انه فى النوى الحاوية على عدد من الجسيمات ليس من مضاعفات الاربعة سوف لا تمتلئ المستويات المناظرة للطاقة بصورة كاملة .

وتبدأ النواة تشبه الى حد كبير من حيث التركيب الذرة ، التي توجد فيها قشرات الكترونية ممتلئة ومغلقة ومستقرة (تذكر الغازات الخاملة) . فلدينا هنا قشرات نووية ممتلئة ومستقرة الى حد كبير ، وتتألف من المجموعات الرباعية وعدد كبير من الجسيمات النووية .

وبالطبع ان التشابه في الشكل لا يكفى لوحده . ولا بد من وجود براهين اكثر سطوعا على وجود قشرات في النواة . ولنلق نظرة على الرسوم البيانية للاستقرار وتوزيع النوى . ولنأخذ بضعة قمم ، ولتكن من أعلاها ، ثم نحسب اى عدد من البروتونات والنيوترونات في النوى يناظر عدد كل منها .

واولها هو الهيليوم — ٤ ، وتتألف نواته — جسيم ألفا — من بروتونين ونيوترونين . ويليه الاوكسجين — ١٦ — ويتألف من ٨ بروتونات و ٨ نيوترونات ، ثم يأتي الكالسيوم — ٤٠ ويتألف من ٢٠ بروتونا و ٢٠ نيوترونا ، وهكذا . واخيرا يكون موقع الرصاص — ٢٠٨ في الطرف الايمن للرسم البياني ويمثل آخر واعلى قمة في المنحنى ، وتحتوى ذرته على ٨٢ بروتونا و١٢٦ نيوترونا . (يجب ان تضاف اليه ايضا نواة القصدير الحاوية على ٥٠ بروتونا . وهي مستقرة الى حد ان الطبيعة تمكنت على اساس « تركيبها » من صنع عشرات النظائر المستقرة ، بينما لا يعرف بالنسبة لاعداد البروتونات الاخرى سوى ٢ — ٥ نظائر مستقرة) .

وهكذا يكون عدد البروتونات والنيوترونات في اكثر النوى

استقرارا كالآتى : ٢ ، ٨ ، ٢٠ ، ٥٠ ، ٨٢ ، ١٢٦ . ويمكن الافتراض بان هذه النوى هى من اشباه ذرات العناصر الخاملة الحاوية على ٢ ، ١٠ ، ١٨ ، ٢٦ ، ٥٤ و ٨٦ الكترونا . وكلا هما — كل فى عالمه — ضربا رقما قياسيا فى درجة الاستقرار .

وقد سميت اعداد البروتونات والنيوترونات المذكورة باسم « الاعداد السحرية » . وفى الواقع يلاحظ فيها شىء من السحر ، اذ ان النوى والقشرات الالكترونية للذرات — وهما عالمان تسيرهما قوانين متباينة تماما — تتصف ببعض السمات المشتركة من حيث التركيب .

والحقيقة ان مقارنة الاعداد السحرية باعداد الالكترونات فى اكثر الذرات استقرارا ستبين لنا الاختلاف الواضح بينها . ولا تنطبق هذه الاعداد الا فى الهيليوم الذى يظهر درجة استقرار عالية فى كلا العالمين فى آن واحد . وليس من الغريب ان تختلف هذه الاعداد . بل بالعكس اذ سيبدو عجيبا لو تطابق هذان الصفان من الاعداد: اذ تختلف تماما ظروف الحياة فى النواة عنها فى القشرة الالكترونية للذرة .

ومع ذلك يوجد شىء من التشابه بين القشرات فى النوى . ويؤكد ذلك التشابه الذى تم الحصول عليه بالتجربة . فلننظر مثلا الى ذرة الكالسيوم (رقم ١٩) . وهى احادية التكافؤ ، اى انها تحتوى على الكترون واحد فى قشرتها اكثر من ذرة الارجون الخاملة ذات القشرة الممتلئة المقفلة . ويساوى اللف العام للقشرة الالكترونية

لذرة الكالسيوم لف هذا الالكترون المكافئ . والحقيقة ان لفوف كافة الالكترونات الباقية تكون بشكل ازواج وفى اتجاهات متضادة مما يجعلها تلغى بعضها البعض ، فيكون مجموعها مساويا للصفر .

ولنقارن ذلك مع نواة نظير الاوكسجين — ١٧ ، التى تحتوى على نيوترون زائد فى القشرة الممتلئة اكثر من اللازم المؤلفة من اربع مجموعات رباعية للجسيمات . وبموجب ما قلناه سابقا فعلينا ان نتوقع بان يكون لف نواة الاوكسجين يساوى لف هذا النيوترون الاضافى . وهذا هو واقع الحال .

وليس هذا التصادف الوحيد من نوعه . فلفوف النواة التى قيست بالتجربة تتفق تماما مع تلك التى تنبأ بها نموذج القشرات النووية .

كيف تظهر أشعة جاما

ستتضح السمات المشتركة بين القشرات الالكترونية والقشرات النووية بشكل افضل اذا ما درسنا اصل نشوء النوع الثالث من الاشعة ذات الفاعلية الاشعاعية وهى اشعة جاما .

وقد استطاع الفيزيائيون بدراستهم لاشعة جاما معرفة الكثير من الحقائق عن حياة الاسر النووية .

وكان اول ما جذب انتباه العلماء هو ان الاطياف الضوئية لاشعاعات جاما النووية تتألف من خطوط منفصلة . ونحن نعرف

الآن معنى ذلك : اذ تستطيع الجسيمات النووية ان تحتوى على طاقات محددة بشكل صارم ، وبتعبير آخر انها يمكن ان تتواجد فى اوضاع محددة فقط . ويؤدى انتقال الجسيمات من وضع الى آخر ، الى انبعاث أشعة جاما .

فما هى مستويات الطاقة النووية هذه ، وكيف تمتلىء بالجسيمات النووية ؟ وتبدو هنا على الخارطة التى رسمها الفيزيائيون الكثير من « البقع البيضاء » الفارغة . ولا يثير العجب ابدا وجود مستويات محددة للطاقة . فقد تنبأت بوجود مستويات الطاقة هذه معادلة شرودنجر لجميع المجموعات المترابطة للجسيمات ، بضمنها طبعا المجموعات النووية .

وفى حالة الذرة فان المعادلة التى تصف تبادل الفعل بين الجسيمات معروفة جيدا ، وهى قانون كولوم حول التنافر المتبادل بين الالكترونات وانجذابها نحو النواة . ويدخل هذا القانون فى معادلة شرودنجر . بينما نجد ان قانون القوى النووية غير معروف حتى الوقت الحاضر بشكل مضبوط .

وكان على الفيزيائيين حلّ مسألة عكسية وهى مراقبة الطيف الضوئى لاشعة جاما ، وبموجبها حساب مستويات الطاقة فى النوى ونظام تتابع امتلائها . وكان الفيزيائيون قد أشغلوا انفسهم فى وقت من الاوقات ، كما يذكر القارىء ، بمثل هذه المسألة حين عملوا على توحيد مستويات الطاقة فى الذرات . وبالاضافة الى ذلك فقد

استحضر العلماء المعطيات حول «درجات سطوع» بعض خطوط أشعة جاما وخصائصها الاخرى محاولين بذلك معرفة القانون الذى يتحكم فى العلاقات المتبادلة بين الجسيمات فى الذرات .

غير انه اتضح بان هذه المسألة صعبة للغاية . وهى لم تحل تماما حتى يومنا هذا . فقد اتضح منذ زمن بعيد بانه سوف لا يمكن حل هذه المسألة ما لم تعرف طبيعة الجسيمات النووية نفسها . وسنتحدث فى الفصل القادم عن بعض الطرق التى يسلكها العلماء فى محاولتها معالجة هذه القضية .

ومع هذا فقد كان مفهوم مستويات الطاقة فى النواة والقشرات المكونة من «سحب الاحتمالات» البروتونية والنيوترونية ، كان مثمرا للغاية . فقد ساعدنا على شرح لأأصل اشعة جاما فحسب بل والكثير من خصائصها ايضا .

وبدا واضحا قبل كل شيء بانه من اجل انبعاث فوتون جاما يجب على النواة اولا ان تنتقل من حالة الاستقرار ذات اقل طاقة ممكنة الى حالة ذات طاقة اكبر ، والتى تسمى تشبيها مع الذرة باسم حالة الهيجان . ولدى عودة النواة الى حالة الاستقرار السابقة او غيرها ينبعث فوتون جاما .

ان القوى النووية هى اقوى من الكهربائية بملايين المرات . لذلك فان المسافات بين مستويات الطاقة فى الذرة تزيد عادة بدرجة كبيرة على مسافات الطاقة فى القشرة الالكترونية . ومن المفهوم ان

فوتونات جاما يجب ان تكون اكثر طاقة من الفوتونات الضوئية بنفس القدر ، وهذا يعنى بان طول موجاتها يكون اقصر على التناظر . وهذا بالضبط ما يلاحظ فى الواقع . ان اشعة جاما ذات اقصر موجات بين انواع الاشعة المعروفة .

وقد اصبح واضحا الآن لماذا تشترك اشعة جاما فى كافة التحولات الاشعاعية للنواة . لان هذه التحولات هى ليست الا انتقال النواة من حالة اقل استقرارا الى اكثر استقرارا . وقد لا يمكن التوصل احيانا الى تحقيق الاستقرار التام بمجرد اعادة بناء البيت الذرى مع القاء او التخلص من الجسيمات « الزائدة » عن الحاجة . وتكون النواة الجديدة فى وضع « هيجان » ولو انها تبدو بوضع اكثر استقرارا من سابقتها . وعندئذ تكون المرحلة النهائية فى اعادة البناء هى انبعاث فوتون جاما ، ولا تصبح النواة بعد ذلك مشعة .

وغالبا ما تستطيع الذرة منح طاقتها الزائدة باسلوب اكثر « ذكاء » ، ولم تتوصل اليه القشرات الالكترونية . فبدلا من ان ترمى النواة فوتون جاما تقوم بايصال طاقة هيجانها الى قشرة الالكترون مباشرة وخلسة . وهذه الطاقة كبيرة جدا الى حد ان هذه « الهدية » النووية تستلم كضربة هائلة تهز اركان البناء النووى كله. وفى الحقيقة ان هذا البناء لا يتحطم كليا بل ان بعض ساكنيه ــ الالكترونات ــ يتطاير من الذرة ، وبسرعات هائلة . وتسمى هذه الظاهرة التى تنافس بنجاح ظاهرة انبعاث اشعة جاما مباشرة بالتحول الداخلى .

هل النوى قطرات ؟

ان القشرات النووية والنوى السحرية .. هى امور تبعث مسرة حقيقية فى قلوب عشاق جمال النظريات العلمية . لكن هذه الصورة الجميلة تنطبق على الكثير من الحقائق التجريبية التى ترفض الدخول فى اطار نموذج القشرات . وهو شىء لا يثير العجيب .

فاولا ، ان القشرات النووية هى ان وجدت لا تشبه تماما القشرات الالكترونية . ومفهوم القشرة فى النواة نفسه هو شىء افتراضى كما عرفنا . وليس للنواة مركز تتجمع حوله الجسيمات النووية . وبالاضافة الى ذلك فان المجموعات المقفلة فى النواة تتألف من عدد من الجسيمات يختلف تماما عما هو فى الذرة . واخيرا ، فان القشرات فى النوى يجب ان تكون من نوعين : بروتونية ونيوترونية .

وهكذا فان كلمة « قشرة » التى جرت استعارتها من عالم الذرة ونقلت الى عالم النواة لا تعكس اكثر من مفهوم انغلاق واستقرار و « اشباع » مجموعات محددة من الجسيمات النووية . ولا يتم ذلك دائما وابدا .

ويمكن الحديث عن القشرات بثقة الى حدما ، فقط فى حالة النوى الخفيفة ، المتكونة من عدد غير كبير من الجسيمات النووية . ولكن عندما يكبر حجم النوى فان حالات الطاقة المنفردة تفقد شيئا فشيئا « صفتها الفردية » . وتصبح النوى « عديمة الشكل » من حيث

التركيب اكثر فاكثر . وسوف يكون عدد الجسيمات النووية كبيرا ، وتلتحم قشراتها بقوة شديدة ، الى درجة ان الجسيمات تفقد اية حركة محددة لها وكأنها تكف عن الخضوع لقوانين الكم .

وفى النتيجة لا تكون هناك اية سمات تشابه النواة والذرة . و ينبغى عندئذ التخلى عن النموذج القشرى للنواة . فاى نموذج يمكننا ان نبتدع للنواة ؟

وقبل قيام الحرب العالمية الثانية بقليل اقترح العلماء ، لاسباب سنذكرها فيما بعد ، النموذج التالى : ان النواة هى قطرة من « السائل » النووى . فالنواة تبدو ظاهريا ككتلة متجانسة ، وليست فيها اية تراكيب مثل جسيمات ألفا او القشور . وافترض ان تكون الجسيمات النووية المنفصلة ـ جزيئات السائل النووى ـ فى هذة القطرة فى حركة فوضوية دائمة .

ويكون للسائل النووى فى النتيجة نوع من السيوبة . ويكون للنواة ، مثل القطرة ، حدود لكنها متحركة ، وسائلة ، وتغير شكلها تبعا للاسباب الخارجية والداخلية المختلفة . ومع ذلك فان سطح النواة لا يتحطم ، اذ تمنع ذلك قوة الشد السطحى للسائل النووى فى حدود القطرة. وتشبه قوة الشد السطحى للنواة تماما قوة الشد السطحى فى السوائل الاعتيادية : فترتبط الجسيمات النووية ببعضها البعض بقوى التجاذب التى لاتعاكسها اية قوى اخرى . والقوى النووية تشد السائل النووى فى القطرة .

على ان التشابه بين القطرة والنواة ينتهى الى هذا الحد . فلنقابل بين الكثافة فى هذين السائلين . ان اى حساب بسيط يظهر لنا بان الجسيمات فى النوى مترابطة بشكل اكثر كثافة بملايين وملايين المرات من الجزيئات فى السائل . كما ان القطرة النووية التى يبلغ حجمها حجم قطرة الماء الساقطة من الحنفية، تزن حوالى المائة طن!

وياله من رقم لا يقبله العقل ! لكننا نعرف جيدا بان صفات الاجسام تعتمد الى حد كبير على كثافتها . فاذا ما قمنا بتغيير كثافة الغاز بآلاف المرات فانه يتحول الى بلور تتحكم به قوانين جديدة تماما . ويتضح لنا الآن بانه لا يجوز الحديث مطلقا عن وجود اى تشابه بين السائل الاعتيادى والسائل النووى ، لان كثافتيهما مختلفتان جدا ، لا بآلاف بل بمليارات المرات ، وان القوى المؤثرة بين الجسيمات النووية تختلف كليا عن القوى المؤثرة بين الجزيئات .

ولنلق الآن نظرة على التشابه الظاهرى بين السائلين .. فلنضع قطرة من الزئبق فوق لوح زجاجي ونطرقه بصورة خفيفة . فنجد ان القطرة تأخذ بالاهتزاز ، وتظهر على سطحها تموجات خفيفة . واذا ما طرقنا اللوح بقوة اكبر قليلا فان كرة الزئبق تنشطر الى عدة قطرات صغيرة .

الا يذكركم ذلك باحد اكبر الاكتشافات الفيزيائية التى جرت منذ زمن قريب ؟ اذ تناقل عالم العلم باجمعه عام ١٩٣٩ نبأ

مثيرا ولم يدرك مغزاه الهائل آنذاك سوى الفيزيائيين . ومفاد النبأ انه تم اكتشاف تقسيم نوى اليورانيوم !

واسرع النظريون فى مختلف البلدان الى شرح الظاهرة الجديدة والمذهلة فى عالم نوى الذرات . وحقق نجاحا فى طرح نظرية فى هذا المجال كل من نيلس بوهر والعالم السوفييتى ى . فرينكيل كل بمعزل عن الآخر . واستطاعا شرح تقسيم نوى اليورانيوم فى نموذج القطرة السائلة للنوى ، والذى اقترحوه من جديد .

انشطار قطرة النواة

كان بوهر وفرينكيل يفكران بالصورة التالية : تعيش النواة فى حياتها الاعتيادية الهادئة ، وحتى يوجد هناك نوع من نظام حركة الجزيئات النووية . فاذا كانت بناية النواة مستقرة فان قاطنيها يعيشون حياة هادئة ومنعزلة .

ولكن فجأة يأتى « زائر » طفيلى هو جسيم غريب . فتحدث فى البناية هوشة كبيرة . ويسرع القاطنون « الفضوليون » فى النواة الى « التعرف » على « الضيف » « ويتبادلون معه التحيات » . وتبدأ فى بناية النواة اعمال عبث حقيقى .

وسرعان ما يصبح من الصعب تمييز الجسيم الغريب عن اهل بناية النواة الاصليين . ويجرى بسرعة توزيع الطاقة الذى جلبه معه هذا الجسيم بين جسيمات النواة ، وفى النتيجة لا يستطيع الجسيم

القادم الى النواة ولا جسيماتها الأصلية مغادرة البناية . فتتكون نواة جديدة سماها بوهر بالنواة المعقدة .

ومع ذلك فبعد مرور بعض الوقت يحصل احد الجسيمات فى هذه النواة على دفعة قوية بدرجة كافية فيعبر الحاجز الجهدى فى حدود النواة ، فيتركها . فاذا كان الجسيم الذاهب يختلف عن القادم ، فان مجموع هذين الحدثين يسمى برد الفعل النووى (nuclear reaction) . واساس هذه التسمية اختلاف النوى الاولية عن النهائية . وكما هو الحال فى الكيمياء حيث تختلف المواد الاولية عن الناتجة فى التفاعل الكيميائى .

ان حالة العبث فى النواة المعقدة تشبه كثيرا الحركة الحرارية الفوضوية للجزيئات فى قطرة السائل . ومن حين لآخر تنبعث من النواة جزيئات منفصلة . ويشبه ذلك « تبخر » الجسيمات من النواة ، « المسخنة » بفعل اصطدام جسيمة غريبة به .

ان ما يحدث عندئذ فى النواة شيء غير معروف فى الواقع . لكن نستطيع القول بان النواة تسلك سلوك القطرة الحارة . فلنتابع سطح هذه القطرة . ونجد انها ترتج وتهتز بصورة مستمرة ، وتحل محل الجزيء المتطاير جزيئات جديدة .

وقد لوحظ منذ زمن طويل بان سعة التذبذب فوق سطح السائل تتوقف الى حد كبير على الشد السطحى للسائل فى القطرة ، وتزداد بنقصانه . ويتحدد الشد السطحى فى قطرة السائل النووى ، كما

اوردنا مسبقا ، بالقوى النووية للجذب . فكلما كانت النواة اكثر ضخامة كلما قلت هذه القوى ، وضعف ربطها للجسيمات النووية . وفى النوى الثقيلة نجد انه حتى الدفعات الضعيفة يمكن ان تؤدى الى حدوث ذبذبات كبيرة على سطحها .

وفى حالة نوى اليورانيوم الضخمة وغير المستقرة جدا (لنتذكر بانها ذات فاعلية اشعاعية بسبب عدم استقرارها) فان مثل هذه الدفعة قد يحدثها نيوترون يصطدم بهذه النواة . وفى بعض الاحيان تؤدى ايه دفعة الى تحطيم نواة اليورانيوم ـ ٢٣٥ مثل ان يصدمه نيوترون حرارى ، اى نيوترون مزود بطاقة تقل بمئات ملايين المرات عن الطاقة الموجودة فى نوى الذرات عادة .

كيف تنقسم قطرة الماء الاعتيادية ؟ نستطيع مشاهدة ذلك بوضوح بواسطة التقاط فلم سينمائى سريع للعملية . فعند حدوث دفعات تبدأ قوى معينة فى القطرة بالرنين ، وتتكون على سطحها موجات عالية جدا . ثم تتمدد القطرة بشكل طولى فى لحظة معينة ، وبعد ذلك تتكون فى وسطها منطقة ضيقة . واخيرا تنقسم القطرة فيها الى جزئين (قطرتين) .

ويمكن ملاحظة حدوث نفس العملية لدى مراقبة كيفية انقسام القطرة فى الحالات الاكثر تعقيد . وعندها تنقسم القطرات لا الى قطرتين فحسب ، بل الى عدد كبير من القطرات الصغيرة وغير المتساوية فى الحجوم .

وقد افترض بوهر وفرينكيل بان انقسام النوى (انشطارها) يجرى نتيجة لحدوث نفس التشويه فى سطح النواة عند سقوط النيوترونات على النوى الثقيلة وغير المستقرة .

اسرار الانشطار النووى

ولكن لماذا ينسب انشطار النواة الى النيوترونات بالذات ؟ ولماذا تفضل النواة الضخمة الانقسام الى اجزاء ضخمة بدلا من « تبخر » اجزاء منفصلة منها كما فى حالة الفاعلية الاشعاعية الاصطناعية فى النوى ذات الكتل الصغيرة والمتوسطة فى الحجم ؟

سنجيب فى البداية على السؤال الاول . ونقول بان للسياج الذى احاطت النواة به نفسها ليعزلها عن العالم الخارجى جانبان . ولكنه لا يشبه السياج الاعتيادى فى كون جانبيه غير متماثلين .

ويكون هذا « السياج » من الجانب الداخلى اكثر انحدارا بالنسبة للبروتونات منه بالنسبة للنيوترونات . ويكون ارتفاعه ، الذى تحدده القوى النووية ، منخفضا بسبب قوى التنافر المتبادل بين البروتونات . ونظرا لوجود هذا الحاجز فان الجسيمات لا تترك النوى فى الظروف الاعتيادية ، وتكون مستقرة نسبيا .

لكن الوضع يختلف تماما من الجانب الخارجى « للسياج » . ويبقى الحاجز قائما بالنسبة للبروتونات . ويعكس ذلك حقيقة ان بروتونات النواة تطرد بجهودها الموحدة كافة اخواتها الطفيليات . اما

بالنسبة للنيوترونات فلا يوجد اى حاجز من الخارج ، لانها تكون متعادلة كهربائيا . ولكنها تجابه بدلا من الحاجز بحفرة قد تسقط فيها النيوترونات عندما تنقذف نحو النواة وتبقى هناك .

لذلك فان على البروتون ، الذى يود اختراق النواة من الخارج ، وبالاخص اذا كانت النواة ثقيلة وكثيرة البروتونات ، ان يمتلك طاقة هائلة تعادل مئات ملايين الالكترون ــ فولت . بينما لا يحتاج النيوترون الى اية طاقة للقيام بذلك . ولهذا قد تدخل النواة النيوترونات حتى اذا ما كانت الطاقة الحرارية لها صغيرة وتعادل اجزاء المائة من وحدة الالكترون ــ فولت .

ولننتقل الآن الى السؤال الثانى . قد يتبادر الى الذهن بان النيوترون عند دخوله الى نوى اليورانيوم ــ ٢٣٥ فانه يعمل على تجاوز الحمل (overload) فيها الى درجة انها تتحطم. لكن النيوترون ليس « القطرة الاخيرة » ، فى قطرة هذه النواة ، التى يكون استقرارها زائدا على الحد . فتستطيع هذه النواة دون اى اخلال باستقرارها ان تستوعب ثلاثة نيوترونات اخرى مكونة نواة اليورانيوم ــ ٢٣٨ .

وبذلك فان النيوترون الجديد القادم الى النواة لا يؤدى الى زيادة الحمل فيها لانه لا يجلب معه طاقة تذكر ، ولا « يدفع » القطرة بقوة . فما هو اذن سر انشطار نواة اليورانيوم ــ ٢٣٥ ؟

ان الوضع معقد حقا ، ونجد انفسنا نعود شيئا فشيئا الى الكلمات. ومجمل المسألة ان نواة اليورانيوم ــ ٢٣٥ لا تنشطر بتأثير اى نيوترون

ومهما كانت طاقته الحرارية . وان طاقة النيوترون القادرة على احداث الانشطار تكون معينة بحدود ضيقة جدا . وتناظر هذه الحدود المسافة بين مستويات الطاقة ، والمناظرة لحالتى الاستقرار والاثارة القريبة لنواة اليورانيوم ـ ٢٣٥ . لذلك فان النيوترونات التى تناظر طاقتها فرق الطاقة للحالتين المذكورتين تؤدى ، وبشكل فعال جدا ، الى اثارة نوى اليورانيوم .

وتكون المسافة بين حالتى الاثارة والاستقرار فى نواة اليورانيوم ـ ٢٣٥ غير كبيرة جدا . وعندما تصبح النواة فى حالة الاثارة فانها يجب ، كما هو الحال فى النوى الخفيفة ، ان تبعث فوتون جاما وأحد الجسيمات ثم تعود الى هذه الحالة المستقرة او تلك . غير انه لا يحدث ذلك .

واليكم السبب . قلنا بان النوى الثقيلة تفضل ان تقذف لا جسيمات منفردة بل المجموعات الرباعية منها اى جسيمات ألفا . ويفسر ذلك بان الحاجز الجهدى لانبعاث جسيمات الفا هو اوطأ بكثير من انبعاث الجسيمات النووية المنفردة . وقد تبين بان حاجز « الكتل » الاكثر ضخامة ، وهى ما تكون عليه اجزاء (شظايا) النواة لدى انشطارها ، لنواة اليورانيوم ـ ٢٣٥ يكون صغيرا جدا .

وعندما تكون النواة فى حالة الاثارة فانها تكتسب القدرة على عبور الحاجز الصغير للانشطار وتنتقل الى الجانب الآخر ... ولكن بشكل شظايا متفرقة .

ويحدث نفس الشيء تماما في حالة الجزيئات . فان الطاقة اللازمة لقذف ولو الكترون واحد من الجزىء تكون كبيرة حقا . بينما نجد ان الطاقة اللازمة لتقسيم الجزىء الى ذرات منفردة تكون اقل بكثير . ولهذا السبب بالذات نجد انه في التفاعلات الكيمياوية ، مثلا ، يتحطم الجزىء لا لتكوين الالكترونات بل الذرات او مجموعات كاملة منها اى شقوق (radicals) .

ويجرى انشطار نوى اليورانيوم — ٢٣٧ بنفس طريقة انشطار نوى اليورانيوم — ٢٣٥ تماما . لكن حالة الاثارة فيه تكون منفصلة عن حالة الاستقرار الابتدائية بمجال واسع للطاقة يصل الى مليون الكترون — فولت . لذا يتطلب « رفع » هذه النوى الى مستوى الاثارة وجود نيوترونات سريعة ونشيطة .

ما هو عدد النوى ؟

لابد وان القارىء نفسه قد ادرك باستحالة القول ان عدد النوى غير محدد قطعا . وكلما كانت النواة اثقل كلما اصبحت اقل استقرارا . حتى ان نواة اليورانيوم تبقى في المتوسط مليارات السنين قبل ان تحرر نفسها بنفسها من جسيم ألفا « الزائد » وتنتقل الى وضع اكثر استقرارا . وليس من الصعب ان نحسب بان النوى الاثقل من نواة اليورانيوم بكثير ستستطيع البقاء مدة طويلة جدا في المتوسط قبل ان تقذف جسيم ألفا .

لكن هناك ظاهرة اخرى تحدد « الرتب الوزنية » للنوى . وقد رأينا الآن كيف ان النوى الثقيلة احاطت نفسها بسياج واطئ جدا بالنسبة لانشطارها الى « كتل » ضخمة . وعندئذ ، ونعتقد أن القارئ بدأ يخمن ذلك ، فانه يجب ان يكون هناك احتمال ملموس للنواة للعبور من تحت هذا السياج .

وسوف لن تكون هناك حاجة لاية نيوترونات ولاية اثارات لان النواة تستطيع الانشطار لوحدها اى ذاتيا ، وتعبر حاجزها الخاص بواسطة طريقة « النفق » ! وهل هذا ما يدور هناك فعلا ؟ وفى عام ١٩٣٩ نفسه اجابت الطبيعة بالايجاب على سؤال الفيزيائيين هذا قائلة : نعم ، هذا هو الواقع . ان الانشطار الذاتى للنوى الثقيلة الذى اكتشفه العالمان الفيزيائيان السوفييتيان فليروف (Flerov) وبيترجاك (Petrzhak) ليس من بُدَع ميكانيكا الكم بل هو حقيقة لا تقبل الجدل !

وكلما كانت النواة اثقل ، وكثر عدد الجسيمات فيها ، كلما ازداد احتمال حدوث مثل هذا الانشطار . وهذا الاحتمال نادر جدا بالنسبة لنواة اليورانيوم ويساوى الصفر تقريبا من الناحية العملية . لكن متوسط طول عمر نوى الكاليفورنيوم (رقم ٩٨) بالنسبة للانشطار الذاتى لا يبلغ مليارات السنين بل سنوات معدودات ، وبالنسبة لنوى النوبليوم (رقم ١٠٢) فان هذا الزمن لا يزيد عن الثوانى .

واخيرا توصلنا الى النواة التى سيزول فيها الحاجز بالنسبة للانشطار كليا تقريبا . ولابد ان تكون هذه النواة غير مستقرة تماما بالنسبة للانشطار ، حتى انها لا تتشكل ابدا اذ تتجزأ الى اجزاء فى اللحظة نفسها . وفى قائمة « التصاميم النموذجية » التى كوناها لتراكيب الذرات نجد ان الرقم الاخير فيها هو ١٢٠ . وهذا يعنى بان النوى (وكذلك الذرات طبعا)، لا يمكن ان تحتوى على اكثر من ١٢٠ بروتونا مهما كانت الظروف .

ان عدد البروتونات هو الذى يحدد بصورة قاطعة استقرار النوى بالنسبة لانشطارها . وفى النوى الثقيلة تزداد قوى التنافر بشدة وفى الوقت نفسه تنقص القوى النووية للتجاذب بين الجسيمات المحيطية البعيدة عن بعضها البعض .

وفى النتيجة تسيطر على الحالة بالقرب من سطح النواة البروتونات الهائجة ، بينما تنسحب النيوترونات من الميدان بهدوء الى الظل . وتمزق قوى التنافر السطح الى قطع فتتحول النواة الى « كتل » كبيرة .

النواة باعتبارها قشرات وقطرة سوية !

لقد بحثنا نموذجين لنواة الذرة . ويكون للنواة بموجب احد هذين النموذجين تركيب قشرى ، يشبه الذرة الى حد ما . اما فى النموذج الثانى فان النواة تشبه قطرة السائل . فاى من هذين النموذجين هو الاصح ؟

ان خير جواب على ذلك هو ان كلا النموذجين صحيحان ... لكن كل فى مجال ظواهره . فيصور النموذ ج القشرى بشكل افضل النوى الساكنة والهادئة التى لا يثيرها اى عامل خارجى . بينما يصور نموذ ج القطرة بشكل افضل النواة اثناء « زوبعة »، وعندما يغلى ويمور كل شيء فيها ، وتصطدم الجسيمات ببعضها البعض بشدة ، وتتبخر من النواة ، وعندها تسوء الحال الى درجة ان النوى نفسها تتحطم الى اجزاء متناثرة .

فما الذى يمنع توحيد هذين النموذجين فى نموذ ج واحد يصور بشكل جيد كلا من مجموعتى الظواهر المذكورتين ؟ اننا تأكدنا لدى دراستنا لمثال نظرية بلانك حول الكمات بان مثل هذا التوحيد بين النظريات ليس من اعمال الخياطة البسيطة .

ان النموذ ج الموحد للنواة والمسمى بالنموذ ج العام ايضا قد اقترح منذ عشر سنوات مضت من قبل الفيزيائى الدانماركى الشهير اوجه بوهر (Oge Bohr) ابن نيلس بوهر . وبالطبع فان هذه النظرية قد ورثت بعض سمات اسلافها ، ولكنها كانت تختلف معها بشكل جوهرى .

واساس النظرية العامة او التعميمية هو مفهوم : ان النواة تسلك سلوكا قشريا ، عندما تكون اعداد البروتونات والنيوترونات فيها تساوى الاعداد السحرية او قريبة منها . وفى الحالة المعاكسة يكون سلوك النواة كسلوك قطرات السائل . كما ان هذا السلوك يتجلى بشكل

واضح جدا عندما يصل عدد النواة خارج القشرات الممتلئة والمقفلة الى حوالى ثلثى عدد الجسيمات فى القشرة الممتلئة التالية .

ومن ذلك نستنتج بان الجسيمات خارج القشرات النووية الممتلئة تكون مسؤولة عن كل الحوادث التى تجرى للنواة ابتداء من تطاير او قذف جسيمات منفردة وانتهاء بانحلال النواة نفسها . اما سلوك الجسيمات داخل القشرات الممتلئة فيكون اكثر تواضعا ولا تقوم بمشاركة النواة فى نشاطها هذا بصورة مباشرة .

ونجد أنفسنا مضطرين مرة أخرى لاجراء المقارنة مع القشرات الالكترونية للذرات . ويتذكر القارئ ان الالكترونات فى قشرات الذرات الخاملة تفيض « بروح التعالى الارستقراطى » . بينما كانت الالكترونات فى القشرات غير الممتلئة تقيم بنشاط علاقات مع الذرات المجاورة ، وتكون الجزيئات والبلورات ، وتشارك فى التفاعلات الكيميائية .

ولكن فى النماذج التعميمية لا يعتبر الفعل المتبادل بين الجسيمات النووية غير كبير جدا ، وان المظهر القشرى ليس هو الاساسى . وربما ، يوجد ، بالاضافة الى الفعل المتبادل « المزدوج » للجسيمات فى النواة ، افعال متبادلة « جماعية » للجسيمات ، تنعكس بصورة افضل فى نموذج القطرة . وتظهر الاخيرة فى تشوهات سطح النواة ، وينعدم فى النواة نتيجة لذلك توزيع شحنات البروتونات الكروى الشكل ، وكذلك بعض الخصائص الاخرى للنواة .

وتطابق الصفات الكهربائية والمغناطيسية وغيرها لنوى الذرات ، التى جرى التنبؤ بها على اساس نموذج التعميم ، الصفات التى حصلنا عليها بالتجربة كل المطابقة .

ونكتفى هنا بالحديث عن النماذج التى يحاول الفيزيائيون بواسطتها معرفة صفات نوى الذرات . وهى ليست كافة النماذج الموجودة ، والتى يتداولها العلماء . بل يوجد عدد كبير منها يتعدى الحصر .

هل من الخير ان يوجد هذا العدد الكبير من نماذج نوى الذرات المختلفة ؟ كلا ، بل بالعكس . فان الذرة التى تبدو كثيرة الاوجه هى فى الواقع ذات وجه واحد لاغير . وان وجود هذا العدد الكبير من النماذج ، التى يعتبر كلا منها جيدا من ناحية وغير مرض من ناحية اخرى ، يدل على ان النواة ذات وجه واحد .. ولكنه غير مألوف وصعب الادراك .

فاذا التقطت عشرات الصور الفوتوغرافية لاجزاء من لوحة فنية فى درجات انارة مختلفة ومن زوايا متباينة ، فاننا لا نستطيع تصور اللوحة ككل .

وفى حالة نوى الذرة فان الصعوبة الرئيسية تكمن فى اننا لا نعرف حتى الآن الكثير عن القوى النووية .

وتؤثر هذه القوى ، سواء اكانت الجسيمات مشحونة أم لا ، على مسافات قريبة جدا منها فقط ، وهى كبيرة جدا . ويمكن ان

نضيف ايضا بانها ، مثل جميع قوى التبادل ، تتوقف على الاتجاهات المتبادلة للف الجسيمات ذات الفعل المتبادل .

وتمكن معرفة القوى النووية بدقة فقط فى حالة توغل علماء الفيزياء الى اعماق الجسيمات النووية نفسها، ومعرفتهم لتركيبها . اما فى الوقت الحاضر فان الفيزيائيين يقتربون فحسب من هذا الموضوع الهائل ، الذى لا يقل سعة بل يزيد الى حد كبير على دراسة نوى الذرات نفسها .

الجسيمات تتطاير من النوى التى لم تكن موجودة فيها أبدا !

نحن نعرف اسرار تطاير جسيمات ألفا وفوتونات جاما من النوى . وبقى علينا ان نكشف سر تطاير جسيمات بيتا ، اى الالكترونات ، من النواة .

وكان الفيزيائيون مفعمين بالتفاؤل عندما بدأوا حلّ هذه المسألة قبل ثلاثين عاما مضت . وقبل فترة وجيزة اعطت ميكانيكا الكم تفسيرا للفاعلية الاشعاعية ألفا وجاما للنواة ، وبدا ان سرّ الفاعلية الاشعاعية بيتا لن يبقى خافيا فترة اطول من الزمن . لكن الطبيعة لم تعجل فى كشف هذا السرّ . ولا يجوز القول بان الفيزيائيين قد عرفوه حتى هذا اليوم .

ان المأزق ، الذى لم تستطع ميكانيكا الكم ان تجد منه مخرجا فى محاولاتها لتفسير هذه الظاهرة ، يبعث على الضيق اكثر لان

الفاعلية الاشعاعية بيتا هى من اكثر طرق اضمحلال نوى الذرات انتشارا . ومنذ ان اكتشفت ايرين كورى وفريدريك جوليو — كورى الفاعلية الاشعاعية الاصطناعية عام ١٩٣٤ ، الناجمة عن قذف النوى بالنيوترونات ، وبالاخص بعد ان اتاح تكوين المفاعلات النووية اجراء هذه العملية على نطاق واسع ، فان النوى الجديدة ذات الفاعلية الاشعاعية التى لا تتواجد فى الظروف الارضية قد بدت كما لو كانت فى كيس وافرغت فى ايدى العلماء .

وقد امكن خلال ربع قرن الاخير تحضير اكثر من ألف نظير مشع جديد بالطريقة الاصطناعية . وتبعث غالبيتها لا جسيمات ألفا بل جسيمات بيتا .

ولعل أول واهم صعوبة فى تفسير انحلال بيتا هى عدم وجود الالكترونات فى النواة . وقد اوردنا اعلاه ، لدى الحديث عن النماذج البروتونية — النيوترونية للنواة ، بعض اسس هذا الاستنتاج . وسنذكر الآن الدافع الرئيسى ضد وجود الالكترونات فى نوى الذرات .

فالمسألة تتلخص فى كون النواة تضيق بالالكترون ! وقد يمكن القول بان الالكترون يتواجد فى النواة اذا ما استطعنا ان « نحشر » فيها جميع السحابة الالكترونية للاحتمال . ان طول موجة دى برويل الالكترونية هى اكبر بمئات المرات من مقاييس حجم النواة حتى لدى بلوغ الالكترونات سرعات عالية جدا ، وعندما تصبح طاقتها بقدر الطاقة النووية . ولكننا تأكدنا بان مقاييس حجم السحابة

الالكترونية اعتمادا على مثال ذرة الايدورجين هى بنفس طول موجة الالكترون .

ولم يتوفر مكان للالكترون فى النواة بسبب ان لفه مجموعا مع مقادير لـّف الجسيمات النووية يولد كميات غير صحيحة للف النواة .

وبعد ان اقتنع الفيزيائيون بصحة ذلك قرروا بشكل قاطع ان الالكترون لا يمكن ان يتواجد داخل النواة. ولكن كيف اذن يتطاير من النواة شيء لا وجود له داخلها ؟ وتقطن فى الذرات جسيمات ضخمة بينما تتطاير منها الكترونات خفيفة جدا . فيشبه الامر قصة حشو المدفع باضخم القذائف بينما تنطلق منه طلقات رصاص خفيفة !

والواقع ان النواة قدمت للعلماء معجزة جديدة . ونلاحظ بالاضافة الى ذلك ان الالكترون المتطاير من النواة قد ارتكب « جريمتين » او مخالفتين ضد قوانين الفيزياء الاساسية . اذ انتهك رأسا قانونين هما : قانون حفظ الطاقة وقانون حفظ كمية التحرك الزاوى .

شريك الالكترون فى الجريمة

توجد فى الفيزياء قوانين ، هى كالأساس ، يستند عليها جميع بناء هذا العلم . وتصّح هذه القوانين بالنسبة لجميع العوالم ولجميع الظواهر .

وهى تنص على ان الحركة لا تتولد من العدم ولا تتحول الى العدم . ويستطيع احد اشكال الحركة ان يولد شكلا آخر ، وتغير الحركة طابعها ، وحتى يمكنها ان تصبح غير ملموسة . ومع ذلك فهى لا تزول ابدا .

وكان العلماء منذ فجر ظهور الفيزياء الكلاسيكية يحتاجون الى قياس ما للحركة . ولم يتطلب الامر الحديث عن نوع الحركة فقط ، بل وقياس مقدارها ايضا . وعندئذ ادخل فى الفيزياء مقداران هما : الطاقة وكمية التحرك .

وقد وجدت فرضية ، ان الطاقة لا تستحدث ولا تفنى ، تعبيرا لها فى عدم تغير مجموع الطاقة وكمية التحرك للاجسام المشتركة فى فعل مشترك . ان ارتداد المدفع لدى اطلاق النار ، وارتفاع درجة حرارة الموتور لدى تشغيله او طرق وتد بمطرقة ثقيلة وغير ذلك من الظواهر الكثيرة المختلفة تخضع جميعا بصورة مطلقة لقانونى حفظ الطاقة وكمية التحرك العظيمين . وقد ظهر بان قانون حفظ كمية التحرك لا يقل عمومية بالنسبة للحركة الدورانية . ويستخدم الراقصون على الجليد هذا المبدأ بالذات فى حركتهم . فيقللون من مدى حركة اليدين بشدة ، ثم يبدأون بالدوران على الجليد بسرعة « تدوخ » الرأس فعلا !

ويمكننا ان نتصور مدى دهشة الفيزيائيين عندما اتضح لهم بان جسيمات بيتا يمكن ان تكتسب اية طاقة (وتعبير أدق ، من

الصفر حتى اقصى مقدار ما) . وان النواة (وقد اتضح ذلك بجلاء تام آنذاك) هى عبارة عن نظام كمى ولها مستويات طاقة معينة .

اى ان اية عملية فى النواة ، وبالاخص المؤدية الى تطاير جسيمات بيتا ، يمكن ان تجرى بحيث ان النواة تنتقل من مستوى الى آخر ذى طاقة محددة فقط . وهذا يعنى بان الفرق بين هاتين الطاقتين وهو الطاقة التى تحملها جسيمات بيتا معها يمكن ان تكون بأى مقدار .

ومن الجدير بالذكر ان طيف طاقة الالكترونات فى انحلال بيتا لا يبدى اية بادرة ، ولو الى أدنى حدّ ، عن وجود « خطوط » تناظر الطاقات المعينة ! وهذا يعنى بان الذرة ، بالرغم مما اظهرته جميع العمليات الاخرى ، اما لا تخضع فى نهاية الامر لقوانين الكم ، واما لا يجرى تطبيق قانون حفظ الطاقة بالنسبة لانحلال بيتا للنوى !

ولا يقتصر الامر على هذا القانون فحسب . اذ يحمل الالكترون من النواة ، بالاضافة الى الطاقة ، لف آخر له يرتبط بشكل مباشر بجوهر الالكترون نفسه . ولكن ظهر بان لف الذرة بعد انبعاث جسيمات بيتا يبقى كما كان قبل انبعاثها . اذن ، ربما يبقى الالكترون لفه فى النواة ؟ كلا ، ان هذا مستحيل على الاطلاق ، فا لالكترون بدون شحنة هو كآلة البيانو بدون مفاتيح ، وكالعالم بدون دماغ !

ولكن ، لا . فان بعض العلماء فقدوا عقولهم حقا لدى مشاهدتهم هذه الظاهرة الماكرة الجديدة للطبيعة . اذ انهم آمنوا فى القوانين

الكمية لحياة النواة الى درجة كبيرة جعلتهم يقترحون التضحية بقانون حفظ الطاقة ، والغاءه باعتباره « كلاسيكيا » .

ولكن سرعان ما اضطروا للتخلى عن هذه الفكرة الطائشة . فاين اذن المخرج من هذا الموقف الحرج ؟ لقد جاء به العالم الشهير ولفجانج باولى . اذ اعلن بانه يوجد للالكترون « المجرم » شريك . فما هى صفاته ؟ من الصعب ايرادها .

ان النواة تكتسب لدى انحلال بيتا شحنة ايجابية اضافية . وهى تساوى فى مقدارها ، وبدقة ، الشحنة التى بعثها الالكترون . ويجرى عندئذ تأين الذرة ، كما يبدو . وهذا يعنى بان شريك الالكترون بدون شحنة ، ويجب ان يكون الكترونا متعادلا .

كما ان لهذا الشريك يجب ان يكون لف يكافىء لف الالكترون لكنه يتجه فى الجهة المعاكسة . وهذان اللفان « يلغيان » احدهما الآخر ، ويؤول مجموع المقدار الى الصفر . وعندئذ يبقى لف النواة عند انبعاث الالكترون وشريكه بدون تغيير ، وهو ما يجب حدوثه .

واخيرا فان الالكترون وشريكه يحملان معهما طاقة تساوى مقدار الطاقة العظمى التى يمكن ان تكتسبها الالكترونات لدى حدوث انحلال بيتا للنواة .

وتكون هذه الطاقة العظمى مكمية (quantized) ، اى انها تساوى تماما الفرق بين مستويى الطاقة اللتين تتواجد فيهما

النواة قبل وبعد انحلال بيتا . لكن توزيع الطاقة بين الالكترون وشريكه يمكن ان يتم باى شكل كان ! ولا تضع ميكانيكا الكم اية قيود على عملية القسمة هذه .

وعندئذ يتم الحفاظ على المكمة (quantization) فى النوى ، ولا يحدث اى اخلال بقانون حفظ الطاقة . ان المخرج الذى وجده باولى من هذه الازمة رائع حقا !

لكننا نستطيع العثور على الالكترون « المجرم » بسهولة بينما لم يشاهد احد شريكه . وسيقول المشككون : « وماذا قلنا لكم؟» ويقوم الفيزيائيون بمحاولتهم الاخيرة فيبدأوا بحساب الصفة الباقية الوحيدة لهذا الشريك ، وهى الكتلة ، بصورة مباشرة . ولكن ظهر بانه من المستحيل حسابها بدقة . غير اننا نعرف بشكل قاطع بانها تكون ، على اقل تقدير ، اصغر بالف مرة من كتلة الالكترون .

وهكذا تم العثور على الشريك العجيب هذا ! فهو بدون شحنة ، وبدون كتلة تقريبا ، ولكن لديه طاقة ولف . وهو يشبه النيوترون ، الذى اكتشف قبل ذلك بقليل ، فى انعدام الشحنة فيه . لكنه اخف منه بملايين المرات . وهكذا اطلقت عليه تدليلا تسمية : النيوترون الصغير — نيوترينو .

وهو لا يشبه النيوترون فى شىء . فالنيوترونات تتبادل الفعل مع البروتونات ، وتتصادم معها ، وتكون أسر مستقرة هى نوى الذرات . اما النيوترينو ؟ انه روح بلا جسد ! وفى الواقع ان الحسابات تبين

بان النيوترينو يستطيع ان يقطع الكون بأجمعه ، والذى يمكن رؤيته بواسطة تلسكوبات الارض ، دون ان يبدى اية بادرة تنم عنه . وباختصار انه لا يتبادل الفعل ابدا مع اى شيء .

وعندما نتقدم فى البحث قليلا نجد انه قد تأكد ، فى النهاية وقبل عدة سنين ، وجود النيوترينو بشكل قاطع بصورة غير مباشرة . فقد كان وضع نظرية انحلال بيتا فى الواقع مثل وضع نظرية القوى النووية خلال سنوات عديدة . وبقيت النظرية الاخيرة « معلقة فى الهواء » اكثر من عشر سنوات الى ان تم العثور على ادلة قاطعة تثبت صحتها وهى : ميزونات ـ باى . اما نظرية انحلال بيتا التى طرحها باولى بالاشتراك مع الفيزيائى الايطالى فيرمى (Fermi) فقد بقيت « معلقة » فترة اطول من الزمن تبلغ حوالى ربع قرن !

ولنعد الآن الى الماضى قليلا . فعلينا ، مع ذلك ، ان نفهم من أين تأتى الالكترونات التى لا وجود لها فى النواة ، لكنها تتطاير منها عند حدوث انحلال بيتا .

الالكترونات تولد فى النوى

لقد ثبت لنا اكثر من مرة بانه تجرى احداث عجيبة فى كل خطوة فى عالم الاشياء المتناهية فى الصغر . وسنواجه فى الباب القادم حدثا شاملا تماما فى هذا العالم ، وهو تحول جسيماته من بعضها الى البعض الآخر . وسنرى بان هذه الظاهرة بالنسبة لعالم الاشياء الدقيقة

هى طبيعية وعادية الى حد كبير مثل الاستقرار النسبى وعدم تغير الاشياء فى عالمنا الاعتيادى .

وقد تعرفنا سابقا على احد هذه التحولات . وهو التحول المتبادل للبروتونات الى نيوترونات والنيوترونات الى بروتونات ، الذى هو اساس القوى النووية . ويتحول البروتون فى هذه العملية ، عندما يبعث ميزون ــ باى ، الى نيوترون يلتقط هذا الميزون ، ويتحول الى بروتون . لكن النيوترون نفسه يستطيع ، كما نتذكر ، ان يبعث ميزون ــ باى ويتحول الى بروتون .

ربما ينبعث هذا الميزون بالذات لدى انحلال بيتا فى النواة ؟ كلا ، بينت الحسابات الدقيقة للكتلة بان هذا امر غير وارد . اذ يتطاير من النواة لا ميزون ــ باى بل الكترون اخف منه بمائتى مرة . ولا تتطاير الميزونات من النواة ابدا فى حالات حدوث انحلال بيتا .

ويجب علينا ان نسبق الزمن مرة اخرى . فبعد مضى عدة سنين بعد اكتشاف النيوترون اثبت الفيزيائيون بان هذا الحجر الاساسى لنوى الذرات هو جسيم غير مستقر . ان النيوترون الحر ّ غير الموجود فى النواة يتحول فى المتوسط بعد مضى ١٢ دقيقة تقريبا ، من ظهوره الى الوجود ، الى بروتون . وعند حدوث عملية التحول هذه يبعث ... الالكترون والنيوترينو !

ويبدو لنا الآن ان حل ّ معضلة انحلال بيتا قريبا . اذ ان هذا

الزوج من الجسيمات بالذات هو الذى يتطاير من النواة . وهذا هو واقع الحال . لكن النيوترون فى النواة هو مع ذلك ليس نيوترونا حرا ! اذ يجب على نيوترون النواة ان يتحول الى بروتون بشكل آخر تماما .

ومع ذلك فمن الخطأ ترك الخيط الذى تم الحصول عليه بمثل هذه الصعوبة البالغة فى متاهة انحلال بيتا . فلربما يصبح النيوترون فى الذرة بطريقة ما حرا « للحظة من الزمن » ؟

كلا ، لا يجوز الحديث عن النيوترون الحر « للحظة من الزمن » ناهيك عن ١٢ دقيقة . ولكن علينا ان نتذكر بان النوى التى تبعث جسيمات بيتا اما ان تكون غير مستقرة نفسها (مثلا ، النوى الضخمة للعناصر الموجودة فى نهاية الجدول الدورى) ، واما انها نقلت الى حالة عدم الاستقرار نتيجة قذفها بالنيوترونات . اما جسيمات بيتا المنبعثة فهى ليست سوى محاولة النوى الانتقال من حالة عدم الاستقرار الى حالة اكثر استقرارا .

قد يجوز احيانا دعم البناء المتداعى بركائز لانقاذه من السقوط مؤقتا . لكننا لا نستطيع ان نغير من وضع جدرانه شيئا . لكن ليس لدى الطبيعة مثل هذه الركائز من اجل دعم « الجدار الخارجى » للبناء النووى المتداعى . لكنها تقوم بعملية الدعم هذه « من الداخل » بشكل يحسده عليها اى بناء فاشل .

وقد شبهنا اعلاه البروتونات بالطوب فى بناية النواة ، اما النيوترونات فبالاسمنت الذى يجمع ما بين الطوب بشكل متين جدا .

لكن ما العمل اذا ما ظهر بان البناء نفسه ليس متينا او مستقرا بحد ذاته اذا ما تعرض لضربة خارجية قوية ، مثل سقوط النيوترون على النواة ؟

ان الطبيعة تقوم باعادة التوازن المفقود لبنايتها بتحويل الاسمنت الى طوب ، اذا ما ظهر بانه كثير جدا ، وبالعكس فانها تحول الطوب الى اسمنت اذا ما كانت كميته الزائدة تهدد بناء النواة بالانهيار .

ويجرى هذا التحول بالذات لدى طرد الشحنة « الزائدة » او « غير الكافية » من النواة . ان الطو ب – البروتون يتحرر ، لدى تحوله الى الاسمنت – نيوترون ، من شحنته ، ويطردها الى مجال البوزترون (وهو شبيه الالكترون ذى الشحنة الموجبة) . ويطرد النيوترون لدى تحوله الى بروتون الالكترون وبذلك يزيد من مقدار الشحنة العامة للنواة .

فبأية سرعة تتم هذه التحولات ؟ ليس بسرعة ١٢ دقيقة بعد تكّونه باى حال . ولقد قلنا بان وضع النيوترون فى النواة يختلف بصورة جذرية عن الظروف التى يتواجد فى ظلها شقيقه الحرّ . وتكون ظروف الحياة فى الذرة احيانا بشكل لا يساعدها على تحمل الوضع غير المستقر حتى بجزء من آلا ف من الثانية .

ويحدث احيانا ان تمنع هذه الظروف انحلال النيوترون او البروتون . وعندها تبقى النواة فترة طويلة قبل انحلال بيتا ، وقد تبقى

لفترة طويلة جدا تقدر بمئات وآلا ف السنين فى المعدل . وليس فى ذلك اية غرابة ، عموما ، فما اكثر « التصاميم النموذجية » للابنية النووية المختلفة ، وبنفس القدر توجد « ظروف سكنية » مختلفة فيها للجسيمات النووية .

لكن ميكانيكا الكم لا تستطيع فى الوقت الحاضر التنبؤ بشكل دقيق بمتوسط عمر نوى بيتا ذات الفاعلية الاشعاعية . ولا يرتبط ذلك بالمعرفة التقريبية جدا لتركيبها النووى فقط ، اى فى نهاية الامر بمعرفة قواها النووية . كما ان ميكانيكا الكم لا تستطيع بعد شرح حقيقة حدوث انحلال النيوترون نفسه .

واساس هذا الانحلال قوى عجيبة ، أدت فى السنوات الاخيرة الى تغيير الكثير من تصورات الفيزيائيين . وسنتحدث عنها فى الباب القادم .

النواة الشرهة !

لنرجع الآن الى بعض الخصائص الهامة جدا لانحلال بيتا . واحدى هذه الخصائص هو ان النوى لا تقذف الالكترونات فقط فى جميع الاحوال .

اذ تتطاير فى بعض الاحيان اشباه مرآوية للالكترونات . وهى تختلف عن الالكترونات فى اشارة الشحنة الالكترونية فقط — فهى موجبة . ان تفسير هذا الشكل من انحلال بيتا (وبالمناسبة

فانه يحدث بنسبة اقل من الانحلال الاعتيادى ، مع انبعاث الالكترونات) اكثر صعوبة . ان النيوترون لا يستطيع قذف الالكترونات الموجبة . ويمكن ان يقوم بذلك البروتون بتحويله عندئذ الى نيوترون . لكن البروتون يختلف عن النيوترون فى كونه مستقرا بشكل مطلق بالنسبة لانحلال بيتا .

ويبرز امامنا من جديد السؤال التالى : كيف يمكن ان تتطاير من النواة جسيمات لا وجود لها فيها ؟ ان الوضع غدا الآن حتى اكثر صعوبة . فنحن نعرف من اين تأتى الالكترونات ، ويمكننا تقدير ذلك ، اذ لها قريب هو نيوترون النواة . ولكن من اين تظهر الالكترونات الموجبة ، او ما يسمى بالبوزترونات ؟

ولقد تم التوصل الى تفسير ذلك ، ولكننا سنؤجل الحديث عن هذا الموضوع ، رغم خيبة أمل القارئ ، الى الباب القادم . وللقارىء الحق فى الانزعاج : فكم عليه ان يتحمل تأجيل عن الموضوع ، وقبل دقيقة واحدة من الوصول الى حل المعضلة ! فهذا يشبه تأجيل القصة قبل انتهائها فى قصص المغامرات !

ونحن نرجو القارئ ان يتحلى بالصبر قليلا . وكل ما يمكننا قوله هو ان حلّ العقدة فى « قصة المغامرة » هذه سيكون مثيرا جدا .

اما الآن ، ولتخفيف حدة خيبة الامل ، فستتحدث عن الاحداث العجيبة عندما تلتهم النواة الالكترونات من قشرة ذرتها

نفسها . وقد اطلق الفيزيائيون على هذا السلوك الوحشى للنوى تسمية رقيقة جدا وهى « اقتناص الالكترون » .

ولكن كيف يمكن حدوث ذلك ؟ لقد قلنا فى بداية الكتاب بان قوانين الكم لحياة الذرة التى اوجدها بوهر تعكس بشكل غير مباشر استحالة « انتحار » الذرات . ولهذا الغرض بالذات اوجدت المدارات التى يمكن ان تعيش فيها الالكترونات ، دون ان تفقد طاقتها للاشعاع ودون ان تسقط بسبب ذلك على النواة .

وفى الذرات الخفيفة حيث تكون شحنة النواة قليلة وعدد الالكترونات غير كبير ، يجرى تحريم ميكانيكا الكم بصورة اكثر صرامة : فلا تدخل « سحابة الاحتمال » للالكترونات الى المنطقة التى تشغلها النواة . اما فى النوى الثقيلة فان اعمق الالكترونات ، اى تلك الواقعة على اقرب القشرات الى النواة ، تكون تحت ظروف مختلفة تماما .

فتقوم بطردها من الخارج الالكترونات العديدة ، اما من الداخل فتجذبها بقوة لا تقل عن ذلك النواة ذات الشحنة الموجبة الكبيرة . ولا تتحمل الالكترونات الضغط المزدوج : فتبدأ السحب الالكترونية بدخول المنطقة المحرمة بالنسبة لها سابقا . ويبرز بعض الاحتمال (ولو انه احتمال ليس كبيرا جدا) بدخول الكترونات الذرة الى النواة .

ولكن ما دام مثل هذا الاحتمال موجودا فان الطبيعة ستحققه

ان عاجلا او اجلا فى هذه الذرة او تلك . وهذا هو ما يسمى باقتناص الذرة للالكترون .

وها هو ذا الالكترون قد دخل الذرة . فماذا يحدث عندئذ؟ ان شحنة النواة تنقص ، وهذا شيء مفهوم ، بمقدار وحدة واحدة كما فى حالة انحلال بيتا البوزترونى . اما اللف ؟ لقد ظهر بان لف النواة ، رغم انه حصل على جرعة اضافية من الالكترون ، لا يتغير .

ان الاستنتاج الممكن الوحيد فى هذه الحالة هو ان اللف الذى يجيء به الالكترون الى النواة ، يحمله منها جسيم آخر . اذ يقوم بذلك النيوترينو شريك الالكترون القديم . لكنه لا ينبعث الآن بصورة زوجية مع الالكترون ، بل بالعكس ، فانه يظهر عندما يختفى الالكترون فى النواة .

وفى النتيجة فان الشاهد الوحيد على « المأساة » التى تجرى فى نوى الذرة هو ذلك الروح بلا جسد المسمى بالنيوترينو . ومن الصعب جدا دعوة هذا « الشاهد » للاستجواب كما نعرف .

ومع ذلك فقد تحقق هذا الامر فى السنوات الاخيرة . فان هذا « الشاهد » ، لدى طيرانه الى نواة اخرى ، يقوم فيها باجراء تحول البروتون الى الكترون موجب ونيوترون ، وسنؤجل الحديث عن العملية ، المعاكسة لتلك ، الى الباب القادم . وسميت هذه العملية بانحلال بيتا العكسى (inverse beta decay) .

ان محاولة اجراء هذه التجربة بنيوترينوات منفردة هى ضرب

من العبث . لان النيوترينو ينزلق بخفة فائقة من كافة المحاولات للامساك به . وهذا يعنى انه لابد من جمع قطعان كاملة من هؤلاء « الشهود » بشكل من الاشكال ، ليتسنى الامساك ببعضها . وهذا ما قرره العلماء .

ولم يكن من الصعوبة القيام بمثل هذه المهمة نسبيا . اذ تتكون فى المفاعلات النووية نتيجة تفاعل الانشطار تيارات قوية من النيوترونات . وعندما تبتلعها مادة جدران المفاعل ، تولد فيها فاعلية اشعاعية اصطناعية . وتلعب دورا كبيرا فى ذلك النوى المستثارة ، التى هى شظايا النوى المنحلة .

وهذه الفاعلية الاشعاعية هى نفسها الفاعلية الاشعاعية — بيتا . ان المفاعل النووى يبعث كل ثانية سحابات كاملة من النيوترينو . وهى تنطلق عبر الجدار الواقى للمفاعل ، الذى يحجز جيدا النيوترونات واشعة جاما ، بصورة اسهل من مرور السكين عبر قطعة من الزبدة .

وقد وضع بالقرب من المفاعل عداد ومضان (scintillation counter) كبير ، مملوء بمادة تتأثر جيدا بالنيوترينو ، وهى محلول أحد مركبات الكادميوم . وعندما كانت نواة الكادميوم تبتلع النيوترينو فانها تقذف البوزترونات التى تومض فى مادة المفاعل (مثل الايدروكربون السائل) .

وفى الواقع ظهرت البوزترونات ! وان السبب فى تكونها واحد ، وهو سقوط النيوترينو على نواة الكادميوم . وهكذا ، فبعد مرور ربع

قرن على طرح باولى لفرضيته تم ايجاد جسيم آخر فى عالم الاشياء المتناهية فى الصغر ، وقد ولدت على طرف ريشة الفيزيائى النظرى .

وظهر فيما بعد ان النيوترينو هو من اعجب الجسيمات فى عالم الاشياء الدقيقة . وسنتحدث عن ذلك فيما بعد .

* * *

ونختتم بذلك رحلتنا مع ميكانيكا الكم فى عالم نوى الذرات . ولا تزال هناك كثير من الادغال المجهولة ينبغى اجتيازها فى « الغابة » النووية . وليس هناك نهاية لهذه الادغال المجهولة .

وسندخل الآن فى اعماق عالم آخر اكثر غموضا لعالم لجسيمات الاولية ، عالم تتجلى فيه بصورة اكثر دقة ووضوحا القوانين التى تنعكس فى الصفات الموجية لجسيمات المادة والصفات المادية للموجات .

من عالم النوى الذرية
الى عالم الجسيمات الاولية

اكتشاف عالم جديد

قد يبدو بانه ليس هناك من شيء اكثر استقرارا من نوى الذرات ؟ فلا يؤثر فيها الضغط او درجات الحرارة العالية ، ولا المجالات الكهربائية والمغناطيسية الضخمة . وان النواة هي اكثر البنايات التي بنتها الطبيعة استقرارا . وهذا ما كان يظنه الفيزيائيون في اول الامر .

لكن تطور العلم قد أدى الى اجراء تغييرات جذرية على هذا الرأي . اذ تبين بان غالبية النوى الثقيلة غير مستقرة . كما وجدت بين النوى الخفيفة والمتوسطة نوى كثيرة غير مستقرة . وظهر شيئا فشيئا كيف تضع الطبيعة الطوب في بنايات الذرة ، وان اى اخلال في النسبة ، مهما كان ضئيلا ، بين عدد البروتونات وعدد النيوترونات في النواة يجعلها غير مستقرة .

كما انه لتفسير انبعاث الجسيمات التي لا وجود لها في النواة والذي يلاحظ لدى انحلال النوى ، فقد افترض بان النيوترون يمكن ان يتحول الى بروتون ، والعكس بالعكس . وأدى ذلك الى فكرة وجود النيوترينو .

وظهر ايضا ان استقرار النوى يعود الى جسيم جديد لم يعرف من قبل هو ميزون ــ باى . وعندما جد العلماء فى البحث عن هذا الجسيم اكتشفوا بصورة عرضية ميزون ــ ميو (mu—meson) .

واتضح للفيزيائيين تدريجيا وبصورة اكثر وضوحا ان عالم الطوب الذى تبنى منه الذرات ونواها هو ليس ثابتا ومستقرا كما كان يعتقد سابقا . اذ اكتشف العلماء فى اعماق الذرة وفى الاعماق المجهولة اكثر لنواة الذرة ظواهر عجيبة جدا اكثر غرابة من تلك المعجزات التى تنبأت بها ميكانيكا الكم من قبل .

لكن ميكانيكا الكم اظهرت كفاءتها فى تفسير هذا الشيء ايضا . وبدت ظاهرة للعيان مقدرتها الرائعة على استيعاب جميع التنبؤات فى عالم الاشياء المتناهية فى البساطة . وكان المتشككون يصعقون فى كل مرة يجرى فيها اثبات هذه التنبؤات الواحدة تلو الاخرى بالتجربة العملية . ومما زاد من روعة الامر ان كل خطوة جديدة فى عالم الاشياء المتناهية فى الصغر كانت تناقض المنطق السليم .

يالهذا المنطق السليم ! ان العلم ما كان ليسير بخطوات كبرى الى الامام لو التزم العلماء بالمنطق السليم الذى اعتدناه فى عالمنا فحسب !

ان اكثر الاكتشافات الكبرى تجرى عندما ينقلب هذا المنطق السليم بالذات رأسا على عقب . وان الجوهر الحقيقى لكثير جدا من الاشياء لا يطفو على السطح دائما ، بل يختفى فى الاعماق .

وان ما اعتاده المرء هو من اكثر الأشياء خداعا « فى غالب الاحيان » .
وينقلب تعبير « فى غالب الاحيان » الى « دائما » عندما يلج العلم العالم الخيالى للاشياء المتناهية فى الصغر .

ولنرجع الى عالم ١٩٢٨ . ولم يعرف آنذاك الشيء الكثير عن هذا العالم . بل كان قد بدأ للتو بفتح ابوابه . ولم يعرف آنذاك الا جسيمان هما – البروتون والالكترون . وكان عمر ميكانيكا الكم لايتجاوز الثلاث سنوات صحيح انها كانت تقوم بحل المعضلات القديمة الواحدة بعد الاخرى، بنجاح كبير . وعرفت ذرة الايدروجين ، وتكون جزيئات الايدروجين وتم قبل قليل تفسير قذف النوى ذات الفاعلية الاشعاعية لجسيمات ألفا ، وذلك بالاستعانة بفكرة تأثير النفق . ولم يكن يعرف بعد أى شيء عن الجسيمات النووية وغيرها وعن جوهرها .

ثم جاء العالم الابجليزى بول ديراك (Paul Dirac) (وكل هؤلاء العلماء المنتصرون من الشباب فعمر اكبرهم وهو ايرفنج شرودنجر ٣٨ عاما وعمر فيرنر هيزنبرج ٢٨ عاما ، وعمر ديراك ٢٥ عاما !) وقال بان نجاحات ميكانيكا الكّم قد لا تكون دائمة . فقد ولدت هذه النظرية على اساس الفيزياء الكلاسيكية التى وصفت الحركة البطيئة نسبيا للاجسام .

فهل يمكننا ان نعتبر بان حركة الالكترون فى الذرة بطيئة حتى بموجب نظرية بوهر القديمة عندما يدور الالكترون فى مداره

حول الذرة بملايين الملايين من المرات فى الثانية ؟ وتكون سرعة الالكترون عندئذ فى الذرات الخفيفة بمقدار آلا ف الكيلومترات فى الثانية ، وترتفع فى الذرات الثقيلة الى مئات آلا ف الكيلومترات فى الثانية .

كلا ، بالطبع ان هذه الحركات ليست بطيئة ! ومعنى ذلك انه لابد من تحويل ميكانيكا الكم الى مثل الحركات السريعة لجسيمات الذرة . فكيف يمكن تحقيق ذلك ؟

ظهرت قبل حوالى عشرين عاما من الوقت المذكور نظرية مكرسة لحركات الاجسام العادية السريعة جدا . وقد سميت هذه النظرية باسم النظرية النسبية الخاصة ، وقام بوضعها البرت اينشتين .

ويرى ديراك انه لابد لنقل ميكانيكا الكم الى الحركات السريعة للاجسام الدقيقة من توحيدها بالنظرية النسبية الخاصة .

الحد الوهمى

اننا لا نستطيع فى كتابنا الصغير هذا بالطبع عرض النظرية النسبية بصورة وافية ومفصلة ، اذ يتطلب ذلك كتابة كتاب آخر بنفس هذا الحجم . ولكننا سنتطرق فقط الى ابعادها التى لها علاقة مباشرة بموضوعنا .

وقبل كل شىء ينبغى علينا ان نحدد بشكل اكثر دقة ماذا يقصد بالحركات السريعة والحركات البطيئة . ولا يثير معنى هذه

الكلمات فى الحياة الاعتيادية اية تساؤلات لدى الناس . فالبزاقة تسير ببطء بينما تطير الطائرة النفاثة بسرعة .

ومن السهولة بمكان ان ندرك بان مفهومنا حول سرعة الحركة هو مفهوم ذاتى تماما . وتقاس بسرعة حركة الانسان نفسه . فالسرعة او البطء تقاس بالنسبة لسرعة السير او الركض او حركة الايدى .

ولكن لنراقب من الطائرة حركة القطار السريع فيثير ذلك فينا العجب ونقول : « انظروا كيف يزحف القطار » . ولكن اذا ما تسنى للمرء التحليق على متن قمر اصطناعى وشاهد عندئذ طائرة نفاثة تطير فانه سيقول عن سرعتها نفس ما قلناه عن سرعة القطار . ان مفهومى السرعة والبطء هما نسبيان جدا حقا .

ولا يمكن للفيزيائيين ان يقتنعوا بمثل هذه المفاهيم . ولابد من ايجاد مقياس دائم بدرجة كافية للسرعة ويرتبط بشكل ما بالانسان من أجل ان يستخدم فى قياس سرعات مختلف اشكال الحركات .

هل يمكن ان تؤخذ كمقياس سرعة حركة الارض فى مدارها حول الشمس ؟ فى الحقيقة انه مقياس لا بأس به عموما . ولكن بما ان الانسان قد توغل بمعونة الاجهزة الفلكية الى اعماق الكون ، فمن الافضل البحث عن مقياس لا علاقة له بالارض وحتى لا بالشمس او اى جرم سماوى معين بشكل عام . بل ايجاد مقياس للسرعة عام لكل ما يمكن رؤيته فى مجال الكون بواسطة التلسكوب .

وتقدم لنا الطبيعة مثل هذا المقياس عن طيبة خاطر . وهو سرعة انتشار الموجات الكهرومغناطيسية فى الفراغ ، او بتعبير آخر سرعة الفوتونات الضوئية فى الفراغ المطلق . وهى تساوى ٣٠٠ الف كيلومتر فى الثانية تقريبا وتعتبر من اكبر السرعات المعروفة .

وليس هناك اية سرعة اكبر من هذه السرعة ، فجميع السرعات بالنسبة الى سرعة الضوء تبدو ابطأ منها . وقد اطلق الفيزيائيون لفظ « سريعة » على تلك الحركات التى تقارب سرعة الضوء . ويبدو هذا التقسيم للحركة افتراضيا بالنسبة لنا . لكن مغزاه عميق .

فعندما تقترب سرعات الجسم من سرعة الضوء فان صفاتها تبدأ بالتغير بشكل جوهرى وبصورة مفاجئة . وسنتحدث الآن فقط عن الاجسام المؤلفة من جسيمات كثيرة ، لان اخذ هذه التغيرات بنظر الاعتبار شيء اكثر بساطة .

واحد هذه التغيرات الواضحة هو ازدياد كتلة الاجسام عندما تقارب سرعتها سرعة الضوء . ويتجلى ذلك من الناحية الظاهرية فى ان الاجسام تبدأ باظهار مقاومة متزايدة للقوة التى تجبرها على زيادة سرعتها . وبنتيجة ذلك ، ومن أجل زيادة سرعة الجسم ، فيجب التأثير عليه بقوة اكبر فاكبر .

ولكن مع ذلك ، فليست هناك اية قوة تكفى لاكساب الجسم نفس سرعة الضوء . وتؤكد النظرية النسبية بانه لا يمكن لاى جسم مادى ان يمتلك نفس سرعة الضوء . وما نقصده بالمادى هنا هو اى

جسم (او اى من جسيماته) يمكن ان يكون فى حالة سكون . ولا يمكن للفوتونات ان تكون فى حالة سكون ، كما سنرى ذلك فيما بعد ، لذلك فان النظرية النسبية لا تنطبق عليها .

ويمكن التعبير عن هذه الفكرة رياضيا بالعلاقة الآتية :

$$ك(ع) = \frac{ك_{صفر}}{\sqrt{1 - \frac{ع^2}{ح^2}}}$$

وفيه ك (ع) — هى كتلة الجسم الذى يتحرك بسرعة ع ، و$ك_{صفر}$ — هى الكتلة فى حالة السكون للجسم ، و ح — هى سرعة الضوء .

ونرى من هذه العلاقة انه باقتراب قيمة ع من ح فان المقام ينقص ببطء اول الامر ، ثم بسرعة شيئا فشيئا . وبموجب ذلك تزداد قيمة ك (ع) لان $ك_{صفر}$ مقدار ثابت لا يعتمد على السرعة . واخيرا فانه عند مساواة قيمة ع مع ح فان كتلة الجسم ك (ع) تصبح كبيرة الى ما لانهاية له . وبتعبير آخر ان كتلة الجسم تصبح كبيرة الى ما لانهاية له .

ولتحقيق ذلك يتطلب وجود قوى عظيمة الى ما لانهاية . ولا توجد فى الطبيعة ابدا قوى كهذه او اجسام ذات كتل بهذا المقدار . ان الكون باجمعه لانهائى، ولكن لا توجد فيه اية «لا نهايات» اخرى .

لكن هذه الصيغة لا تنطبق على الفوتونات ، كما اوردنا ذلك

من قبل . والاصح انها لا تخضع لاى شيء . والفوتونات لا يمكن ان تتواجد في حالة السكون . وبتعبير آخر ان كتلة الفوتونات تساوى الصفر . وبوضع قيمة ك صفر هذه فى العلاقة المذكورة فاننا نحصل عند سرعة الفوتون المساوية ل ح لكتلة الفوتون ك (ع) على المقدار صفر/صفر. ومثل هذا الكسر فى الرياضيات يكون غير محدد ، اى يمكن ان تكون له اية قيمة .

والحقيقة ، وكما سنرى فيما بعد ، ان كتلة الفوتون يمكن ان تكون باية قيمة ، كبيرة او صغيرة . لكنها تتواجد فقط فى حالة ع = ح. وبتعبير آخر ان الفوتونات يمكن ان تتحرك بسرعة الضوء فقط.

هذه هى سرعة الضوء! ولا يستطيع اى جسيم مادى ان يكتسب مثل هذه السرعة ، ومن ناحية اخرى فان اى فوتون لا يستطيع ان يكتسب اية سرعة غير هذه! وهكذا فان سرعة الضوء هى حد فاصل بين الجسيمات المادية والفوتونات .

لماذا لا نلاحظ فى الحياة الاعتيادية ازدياد كتل الاجسام الذى تقول به النظرية النسبية ؟ وما هى سرعة اكثر الاجسام التى يطلقها الانسان سرعة ؟ انها السرعة الكونية الثانية التى تساوى ١١ كيلومترا فى الثانية تقريبا . ولنحسب مقدار ازدياد كتلة الجسم الذى يكتسب مثل هذه السرعة بالمقارنة مع نفس الجسم لدى وجوده فى حالة السكون على الارض . فاذا ما كان وزن الجسم على الارض ١٠٠ كيلومتر فان وزنه يزداد لدى اكتسابه السرعة المذكورة بمقدار ٣٥ر٠ مليجرام !

ولكن اذا كانت سرعة الجسم ٢٥٠ الف كيلومتر فى الثانية فان كتلته تزداد بمقدار اكثر من مرتين بالمقارنة مع كتلته فى حالة السكون . وهذا ما يحدث مثلا ، لجسيمات الذرات المشحونة التى يجرى تعجيلها الى سرعات هائلة فى مكنات خاصة تدعى بالمعجلات (accelerators) . وتؤخذ هذه المسألة بنظر الاعتبار لدى تصميم المعجلات .

بعض الكلمات الاخرى حول النظرية النسبية

عند اقتراب سرعة الجسم الى سرعة الضوء فان الاعاجيب لا تحدث لكتلة الجسم فقط . اذ يتغير فيها بصورة جذرية ايضا سير الزمن . وقد سمى الفيزيائيون هذا الزمن بالزمن الحقيقى للجسم . ان جسم الانسان يعيش وفق توقيت « ساعته » الخاصة . ويتحدد سير هذه الساعات بايقاع العمليات الحيوية فى الجسم .

ومن الناحية الاخرى فاننا نستيقظ ونذهب الى العمل والمسرح وننام بموجب « التوقيت » العام ، وحسب توقيت الساعات الاعتيادية التى يخضع سيرها لتبادل النهار والليل ، اى « لايقاع » دوران الارض حول محورها .

ونحن نقول عن هذا الزمن بالذات : « لكم مضى الوقت سريعا « او بالعكس » لكم يمضى الوقت بطيئا » . وبالطبع ان اقوالنا ذات سمة ذاتية ، وهى تعتمد على ايقاع وتوتر نشاطنا . لكن هناك جانب موضوعى من المسألة . وكلما كان الايقاع أسرع كلما مضى الوقت بسرعة اكبر .

وهناك حالة مشابهة جدا لهذه الملاحظة في النظرية النسبية . اذ تؤكد بانه كلما ازدادت سرعة حركة جسم ما فان زمنه الذاتي يمضي ببطء اكبر ، فمن وجهة نظر هذا الجسم يبدو ان الزمن « العام » يمضي بسرعة اكبر .

ويعرف « التناقض الظاهري للساعات » جيدا اليوم لمن يهمهم امر الرحلات الفضائية البعيدة . ففي الروايات الخيالية نجد ان البطل الذي يحلق على متن صاروخ فوتوني بسرعة تقارب جدا سرعة الضوء يعود الى الارض بعد ان امضى في الفضاء حسب توقيته الزمني عشر سنوات مثلا . فيعرف بان اصدقائه الاقربين قد ماتوا منذ زمن طويل فيقول متأسفا : « لكم مضت هذه الاعوام بسرعة » . والحقيقة ان زمنه الخاصة قد مرّ على متن الصاروخ بصورة ابطأ من الزمن على الارض .

ويمكن التعبير عن كل ما قيل عن الزمن بالمعادلة الرياضية التالية :

$$ن(ع) = ن_{صفر}\sqrt{1-\frac{ع^{2}}{ح^{2}}}$$

وتمثل العلامة $ن(ع)$ هنا الزمن الذي مضى بموجب « التوقيت » الخاص لرائد الفضاء و $ن_{صفر}$ الزمن الذي تشير اليه الساعات على الارض . اما المقادير الاخرى في هذه المعادلة فلها نفس المعاني

السابقة . ونستخلص من هذه المعادلة ايضا بان الزمن لا يسير ابدا بالنسبة للفوتونات التى تتحرك بسرعة الضوء ، ولو امكن وضع الساعات على الفوتونات لتوقفت الاولى عن الحركة .

وهناك تناقضات ظاهرية كثيرة فى النظرية النسبية لكننا سوف لا نتطرق اليها الآ ن . فامامنا معادلة اخرى لهذه النظرية ستلعب دورا هاما جدا فيما بعد . وهى اشهر معادلة لاينشتين ، ونجدها اليوم فى جميع الكتب الدراسية .

$$\Delta\text{ف}_{\text{صفر}} = \text{ك}_{\text{صفر}}\,\text{ح}^{2}$$

وترمز $\text{ف}_{\text{صفر}}$ الى طاقة الجسم غير المتحرك عندما تكون كتلته فى حالة السكون $\text{ل}_{\text{صفر}}$. وتسمى بطاقة السكون او الطاقة الذاتية للجسم تمييزا لها عن الطاقة الكينماتية او طاقة الجهد .

ومن الظاهر انها لا تعتمد على سرعة ولا وضع الجسم . ولا تعرف الفيزياء الكلاسيكية الا النوعين المذكورين اعلاه من الطاقة . ولا تدخل فى نطاقها الطاقة « الجديدة » . وهى ذات صفات خاصة .

وسنشرح مفهوم هذه الطاقة فيما بعد . اما الآن فلنرجع الى الحديث عن كيفية ادخال النظرية النسبية الى ميكانيكا الكم .

أولى المصاعب

لقد وجدنا ان ديراك يحاول الجمع بين اعظم نظريتين فى القرن العشرين فى نظرية واحدة . ويجب على « السبيكة » الجديدة

ان تزيد بشكل محسوس من « متانة » نظرية الكمات بوجه هجوم الحقائق الجديدة حول حياة عالم الاشياء المتناهية فى الصغر .

وكانت علاقة شرودنجر « مفتاح عام » لميكانيكا الكم ، امكن بواسطته فتح خزانات الطبيعة ذات الاشكال المختلفة . لكنها لم تتمكن من استيعاب عدد من الحقائق ، مما اوجب اجراء تحسينات عليها بشكل ما .

وسرعان ما أتضح ان عمل سبيكة من هذه النظرية مع النظرية النسبية ليس أمرا سهلا ابدا . وكان اول ما فكّر به ديراك هو أن العلاقة المعدّلة ستعطى حلولا لا متغيرة نسبيا . (وقد ظهر فيما بعد بانه لم يكن على صواب كليا ولكن من يدرى ، فلولا هذا الخطأ « السعيد » لما تسنى لديراك ملاحظة اكتشافه الهام !) .

والآن لنوضح معنى هاتين الكلمتين الخطيرتين : لا متغير نسبيا ! انهما تتضمنان حكما صارما على جميع النظريات الفيزيائية . وان نظرية تحمل مثل هذه السمة قمينة بان ترسل الى الارشيف لحفظها ، فلا فائدة منها !

والمسألة تتلخص فيما يلى : هل لاحظت فى وقت ما اى فرق بين لعب الكرة على الارض ام على متن باخرة ، بل هل حاولت تصور الامر على متن طائرة ؟ الحقيقة انه ليس هناك اى فرق بين اللعب فى كل هذه الحالات ، بشرط ان تكون حركة الباخرة او الطائرة منتظمة وبسرعة ثابتة .

لكننا لا نستطيع التمييز بين حالة السكون والحركة المنتظمة مهما كانت سرعتها باغلاق اعيننا واذاننا . فلولا رؤيتنا لتعاقب النهار والليل لما استطعنا الاحساس بحركة او دوران الارض حول محورها ولولا تعاقب الشتاء والصيف لما استطاع الناس معرفة وجود حركة الأرض حول الشمس . والواقع ان المثالين الاخيرين غير صحيحين تماما . فان اى حركة تتم بتعجيل أو تسارع . ولكن بما ان التسارع فى هذه الحالة ضعيف ، فيمكن اعتبار كلتا الحركتين منتظمتين .

ان جميع حركات الاجسام على متن صاروخ يتحرك بسرعة تقارب سرعة الضوء يجب ان لا تختلف عن نفس الحركات على الارض (بالطبع اذا ما اوجدت فى الصاروخ جاذبية تعادل الجاذبية على سطح الارض) . ولكن بما ان حركات الاجسام لا تتوقف على سرعة «المجموعة» التى تحسب اوضاعها فى الفراغ بمرور الزمن ، سواء اكانت الارض ام صاروخا – فان قوانين حركة هذه الاجسام لا يجب ان تتوقف على «مجموعة القياس» او مجموعة الاسناد .

ويجب ان تكتب قوانين الحركة بشكل معادلات واحدة فى جميع المجموعات مهما كانت سرعتها اثناء الحركة منتظمة بالنسبة لبعضها البعض . وبتعبير آخر ان هذه المعادلات يجب ان لا تتغير بتغير السرعات .

ومفهوم عدم التغير هذا هو الذى يطلق عليه الفيزيائيون تسمية «لا متغير نسبيا» . ومعناه بالضبط انه اذا نصت المعادلة على ان

الكرة تطير بموجب منحنى معين على متن صاروخ يطير بسرعة الضوء تقريبا (ولنقل انه بشكل قطع زائد) ، وانها تطير بموجب منحنى آخر على سطح الارض (ولنفرض انه بشكل قطع ناقص) ، فهذا يعنى بان هذه المعادلة كتبت بشكل خاطئ ويجب اهمالها .
وهذا ما حدث فى اول محاولات تعديل علاقة شرودنجر .

اكتشاف مفاجئ

اقترح ديراك وسيلة غير اعتيادية تماما للخروج من هذه المشكلة : فادخل فى علاقة شرودنجر اربع دوال موجية بدلا من دالة واحدة . وكانت العلاقة التى حصل عليها تشبه كثيرا العلاقة الاولية . لكن الاخيرة اعطت حلولا لا متغيرة نسبيا رائعة .

وقد حصل على اربعة حلول بقدر عدد الدوال الموجية الموجودة فى العلاقة . ولكن تطلب الامر منهم الحصول على اربعة « احتمالات » للالكترون بدلا من احتمال واحد .

ولم يكن مغزى الحلين الاولين واضحا ، وربما تطلب الامر سنوات عديدة من أجل تفسيره لولا اكتشاف لف الالكترون قبل ثلاث سنوات من ذلك . نعم ، انه اللف صديقنا القديم الذى تحدثنا عنه بحرارة فى السابق .

وقد تبين بان الحلين الاولين لعلاقة ديراك يناظران الاتجاهين الممكنين للف الالكترون بالنسبة لاتجاه حركته . وتم حساب مقدار

اللف بموجب هذا الحل فظهر ان النتيجة تطابق نتيجة التجربة تماما !

وعلينا الآن ان نتحدث عن اللف بمزيد من التفصيل . فقبل كل شيء ان اللف يطابق نوع من حركة الالكترون الذى تقارب سرعته سرعة الضوء . وفى الواقع اذا ما حاولنا ان نفسر (للحظة فقط !) اللف بانه نتيجة « دوران الالكترون حول محوره ذاته » (لقد اشرنا فى السابق بان هذه الصورة لا تطابق الواقع ابدا) ، فسيظهر لنا بان سرعة الالكترون فى هذا « الدوران » هى أقل من سرعة الضوء بجزء قليل جدا من المئة .

ومما لا شك فيه ان هذا « النوع » من الحركة ، الذى تحدثنا عنه بشأن اللف ، ليس له أية علاقة بالحركة الاعتيادية للالكترون فى الفضاء الاعتيادى . ان لف الالكترون لا يتوقف أبدا على هذه الحركة الاعتيادية . وهو يوجد بغض النظر عن كون حركة الالكترون سريعة ام بطيئة ، ام كونه فى حالة السكون التام . ولا يتغير معنى اللف عندئذ باى حال .

ان اللف هو من الصفات الاساسية للجسيمات مثل طاقة سكونها مثلا . ولا يجوز تغيير لف الجسيم دون تغيير نوع الجسيم نفسه . وسنتحدث عن ذلك فيما بعد .

باى شكل يظهر اللف ؟ لقد تحدثنا سابقا عن هذا الامر باختصار لدى حديثنا عن الاطياف الذرية . فمنذ نهاية القرن الماضى اتضح

بانه لدى وضع مادة ما فى مجال مغناطيسى فان خطوط طيفها تتجزأ الى اعداد متفرقة من الخطوط الباهتة بدرجة اكبر . وفى نهاية الامر تبين بان الخطوط الطيفية لجميع العناصر تعانى من نفس هذا التجزوء.

ولم يتسن فهم طبيعة هذه الظاهرة (وقد أطلق غليها اسم تأثير زيمان — Zeeman effect) ، وبالاخص سبب تجزء الخطوط الى عدد مختلف من الخطوط « التوابع » ، الا فى عام ١٩٢٥ عندما طرح الفيزيائيان الشابان أوهلنبيك (Uhlenbeck) وجودسميت (Goudsmit) مفهومهما حول اللف .

وبعد ذلك جرى تفسير الظاهرة كالآتى : يوجد للالكترون لّف او كمية التحرك الزاوى . ولا يهم الآن أصل اللف بل المهم انه يطابق حركة ما للالكترون . لكن حركة الالكترون ليست الا تيارا كهربائيا ، ينبع من جسيم واحد . اما التيار « الحقيقى » فيتولد من حركة عدد كبير من الالكترونات .

وان للتيار ، كما هو معروف منذ اكثر من قرن ، تأثير مغناطيسى . وبكلمة أخرى يمكن تصور الالكترون بشكل مغناطيس صغير دائم . واذا ما وضع هذا المغناطيس فى مجال مغناطيسى فسيكون له اتجاه فيه . ويكون الاتجاه فى ابسط الحالات كالآتى: يتجه احدهما على طول المجال المغناطيسى (مستقر بصورة مطلقة) ، ويتجه الآخر بعكس اتجاه المجال (غير مستقر بصورة مطلقة) .

ولكن ما هو الاستقرار ؟ عندما يكون المغناطيس الصغير موضوعا على طول المجال ، فان طاقة الجهد فيه داخل هذا المجال تكون بادنى مقدار ممكن . وبالعكس عندما يكون المغناطيس الصغير بعكس اتجاه المجال فان هذه الطاقة تكون على اقصاها .

فما هو الفرق بين هاتين الطاقتين فى الكمية ؟ ويمكن حسابه بسهولة ويحول الى الفرق بين اطوال موجات الفوتونات ، التى تبعثها الالكترونات فى الذرة . ويكون لف الالكترونات على طول وعكس اتجاه المجال المغناطيسى .

وعندئذ يظهر لنا بان جميع الخطوط المزدوجة للطيف انما تتجزأ بقدر عدد الاتجاهات المتعاكسة للف الالكترون .

والمسألة الاخرى تتعلق بالخطوط « العريضة » التى تتجزأ الى « تابعين » او « اربعة » او عدد اكبر من « التوابع » . فان اتجاهى اللف (ومفهوم انه لا يوجد اكثر من اتجاهين اذ ان المغانيط الالكترونية تقفز فورا الى وضع مستقر جدا ، ولا تقف فى منتصف الطريق) يعطيان زوجا من « التوابع » فقط !

وهنا نتذكر بان الالكترون يشارك ايضا فى الحركة بالقرب من نواة الذرة ، بالاضافة الى حركته « الخاصة » المتعلقة باللف وفى الواقع ان الحركة المذكورة هى ايضا من « نوع خاص » : وان تصورها بشكل « سحابة الاحتمال » لا يتيح لنا التفكير فى ازاحة اكثر وضوحا للالكترون فى الذرة .

لكنها مع ذلك حركة ايضا ، وتيار « وحدى » ، تذكرنا صفاته بالمغناطيس الصغير . ويتعقد الامر تماما الآن : فا لالكترون فى الذرة يشبه المغناطيس المزدوج .

فما هو سلوك مثل هذا المغناطيس داخل مجال مغناطيسى ؟ انه لأمر يثير الاهتمام حقا . فيمكنه ان يكتسب بدلا من الاتجاهين ثلاث او أربع او عدد اكبر من الاتجاهات . وقد يتوقف المغناطيس الالكترونى لدى انتقاله من اتجاه اقل استقرارا الى اتجاه اكثر استقرارا فى الاوضاع البينية لفترة طويلة . وتكون الطاقات فى هذه الاوضاع اجزاء صحيحة من اكبر طاقة موجودة بين الوضعين الطرفيين للمغناطيس . وهذا يعنى بانها ليست اية طاقات بل طاقات معينة تنفصل عن بعضها البعض بفترات كميّة ذات مقدار معين . وقد سمى الفيزيائيون هذه الظاهرة ، ظاهرة الاتجاهات المعينة للمغانيط الالكترونية فى مجال مغناطيسى بالمكمية الفراغية (space quantization) .

وتتضح لنا الآن الاشياء الاخرى . فيتجزأ الخط الطيفى الى عدد من الخطوط التابعة بقدر عدد الاتجاهات الممكنة فى المغناطيس الالكترونى . ويظهر حساب الفروق فى اطوال الموجات التابعة مرة اخرى تطابقه التام مع التجربة .

وبذلك سنختتم حديثنا الآن حول اللف الذى طرح نفسه فجأة من علاقة ديراك . ويبقى امامنا حلان آخران لهذه العلاقة .

اكتشاف مفاجئ اكثر

ان هذين الحلين متشابهان ايضا ، مثل الحلين الاولين المناظرين للاتجاهات المتضادة للف ّ الالكتروني .

ولدينا هنا متضادتان ايضا . اذ يناظر احد الاتجاهين الطاقة الكلية الموجبة للالكترون ، بينما يناظر الآخر الطاقة الكلية السالبة للالكترون . فما العجب في ذلك ؟ لقد رأينا اكثر من مرة بان الطاقة الكلية يمكن ان تأخذ اية اشارة ويتوقف ذلك على كون الالكترون يطير بصورة حرة ام انه يرتبط الجسيمات الاخرى ، في الذرة مثلا .

لكن علاقة ديراك قد كتبت للالكترون الحر فقط !

صحيح ! ... لكن هذا يعني بان الكترون ديراك يكون حرا ومقيدا في آن واحد . اي هراء !

ويعلم ديراك نفسه بان ذلك محض هراء . والاسهل من ذلك طبعا ان نقوم بما يقومون به عادة للتنصل من الشيء ، فيقال بان : « مساحة المكان تساوي ٢٠ مترا مربعا زائدا او ناقصا » . فنهمل الحل السلبي باعتباره يناقض المنطق السليم ! او نبعد الحل ّ ذا الطاقة السلبية للالكترون الحر باعتباره لا يقبل التفسير فيزيائيا !

غير ان ديراك لم يتسرع في ذلك . وباعتباره رجلا انجليزيا فانه ربما كان مفعما بالنظرة السليمة للامور . لكنه توغل في بحثه عن اسباب هذا الهراء باعتباره رجل علم حقيقي . فلربما توجد في هذا الهراء فكرة خفية ، فما هي ؟

وبعد تأمل طويل طرأت على ذهن ديراك فكرة هامة . وهى ان الحل « غير المعقول » يعود لا الى الالكترون بل الى جسيم آخر ذى شحنة تناقض شحنة الالكترون . وبما ان شحنة الالكترون سالبة فان شحنة هذا الجسم لا بد وان تكون موجبة . ويجب ان تكون الشحنتان متكافئتان فى القيمة المطلقة . واعتقد ديراك بان البروتون قد يكون الجسيم المذكور . لكن سرعان ما اتضح بان الطاقة السلبية يجب ان تعود الى جسيم ذى كتلة تساوى كتلة الالكترون تماما . ومن المفهوم ان البروتون غير صالح لذلك اذ ان كتلته اكثر من كتلة الالكترون بالفى مرة . اذن فلا يمكن ان يكون هذا الجسيم سوى شبيه الالكترون المرآوى .

لكن هذا الافتراض لا يقدم تفسيرا للطاقة الكلية للجسيم الموجب. وبما ان الطاقة سالبة فان الجسيم لابد وان يرتبط بقوة ما . ولكن باى شيء ؟ فا لالكترون حر بصورة مطلقة، و « ابعدت » كافة الجسيمات الأخرى بعيدا جدا عنه لدى حل العلاقة ، مما يستبعد احتمال التأثير الكهربائى معها ، ويتحرك الالكترون لوحده فى الفراغ المطلق الذى ليس له حدود . فمن اين جاء الجسيم الموجب الثانى ، الذى هو الشبيه المرآوى للالكترون ؟

وهنا يطرح ديراك فكرته الاساسية الجريئة الى أقصى حد . ان الفراغ ، الفضاء ، الذى لا يوجد فيه اى جسيم سوى الالكترون لوحده ، لا يعتبر فراغا ! بل بالعكس فانه مليء بالالكترونات حتى

الثمالة ! وان شبيه الالكترون المرآوى الموجب بمثابة ثقب فى فراغ ممتلىء !

ان هذا الكلام محض جنون ، كما نرى . فاين عنصر الجرأة فيه ؟ وهذا ما سنبحثه الآن .

كيف نسمى الفراغ الذى لا يستطيع اى جهاز مهما بلغت درجة حساسيته ان يلتقط اى جسيم فيه ؟ سنسميه ، طبعا ، بالفراغ المطلق .

ولكن حذار ! فاذا وجدت فيه جسيمات انعدمت فيها امكانيات تبادل الفعل مع الجهاز ؟ فهل ان هذا الفراغ يعتبر فراغا مطلقا مهما امتلأ بالجسيمات ؟

بالطبع . ولكن كيف يمكن ان تفقد الجسيمات القابلية على تبادل الفعل ؟ ان هذا يناقض جوهرها نفسه !

لنؤجل اعطاء استنتاج بذلك لبعض الوقت . ولنحاول ، على سبيل المثال ، تحسس تركيب الفلز بواسطة مجال كهربائى ضعيف . ويمر التيار فنقرر عندئذ بان الفلز قد امتلأ بالالكترونات الحرة : لكننا اذا ما اقتصرنا على القيام بهذه التجربة فاننا سوف نحصل على صورة غير صحيحة عن الفلز . ففيه عدا ذلك ذرات ليس لالكتروناتها قابلية تبادل الفعل مع الاميرمتر مثلا . وتقبع هذه الالكترونات فى « حفرة » فى مستويات الذرة .

وهي لا تستطيع ان تقفز الى خارجها لتبادل الفعل مع جهاز القياس ، فليس لها الطاقة الكافية لذلك .

ولكن قد يعترض القارئ قائلا باننا نستطيع ايجاد الذرات وحتى نوى ذرات الفلز في تجربة اخرى وباستعمال جهاز آخر . بينما لا يمكن العثور على الفراغ باى جهاز . لذلك فلا يوجد فيه اى شيء .

هذا ما يطرحه المنطق السليم . لكن لديراك رأى آخر .

فالفراغ قد امتلأ بالالكترونات حتى الثمالة . ويشارك الكون باجمعه في صنع الفراغ الموحد الذى يمتد الى ما لانهاية . ويقوم عدد لانهائي من الالكترونات فيه بملء عدد لانهائي من مستويات الطاقة في الفراغ « الى اعلاها » . مكوناً « مجموعة » مترابطة موحدة من الجسيمات . وحسب مبدأ باولى فيمكن ان يتواجد في كل مستوى الكترونان ذوا اتجاهين متضادين للفّ لا اكثر .

ان « الحفرة الكونية » العامة التى تقبع فيها الالكترونات ليست ذات حجم واسع جدا فقط بل انها عميقة جدا . ويقع أعلى مستوى فيها على مسافة للطاقة $ك_{صفر}$ $ح^{٢}$ عن الصفر للطاقة الكلية في الاسفل. وهكذا فان جميع الالكترونات في الفراغ يجب ان تكون ذات طاقة سالبة .

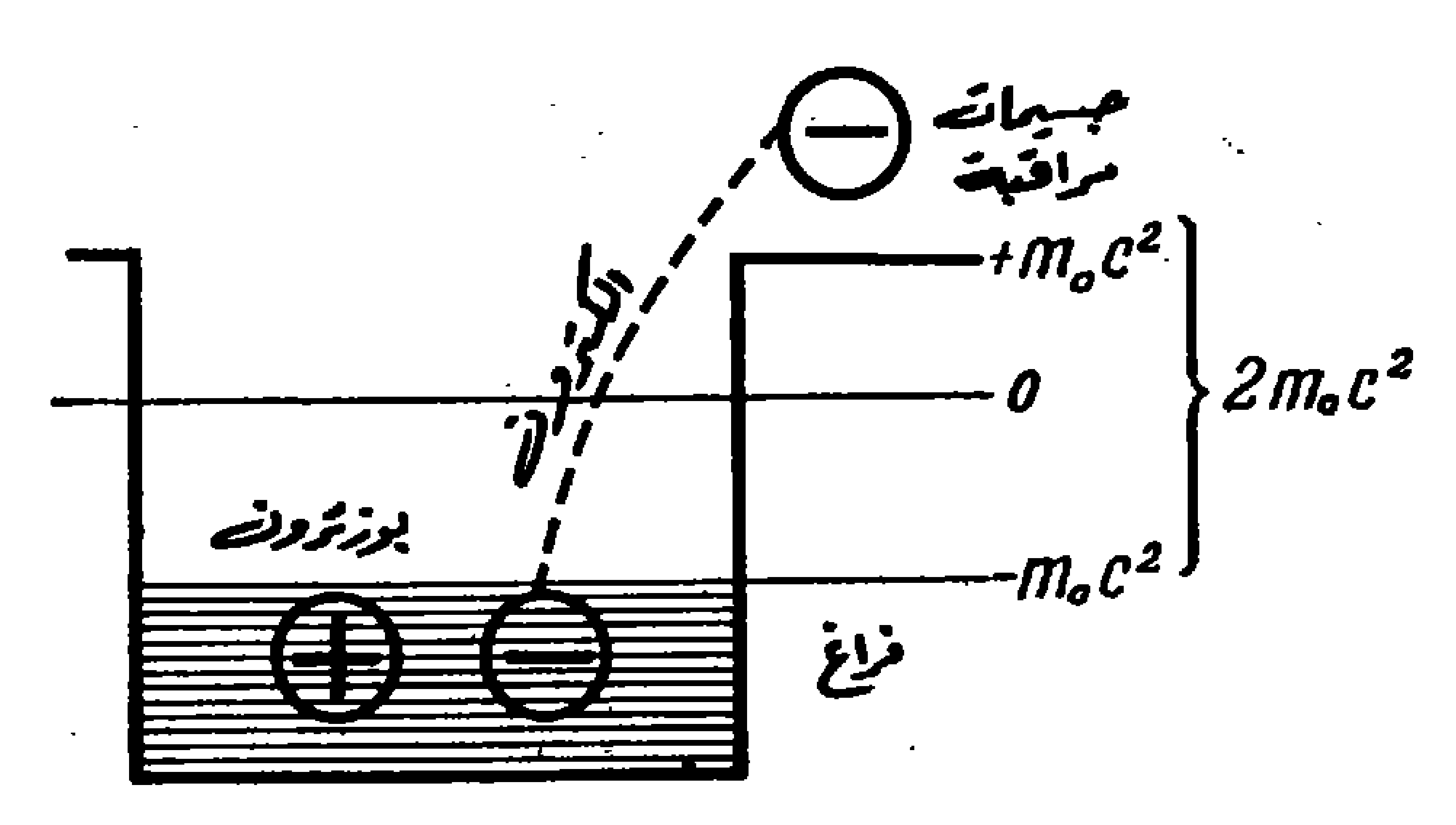
ولا يمكن العثور على الالكترونات الفراغية هذه بواسطة اى من الاجهزة الى ان تغادر الحفرة . وقد يبدو بانه يكفي لهذا الغرض اكسابها طاقة $ك_{صفر}$ $ح^{٢}$. لكن هذا لا يكفي . وقد لاحظنا اعلاه

بان اى جسيم ، بغض النظر عن كونه فى حالة حركة او سكون ، يمتلك طاقة خاصة به $ك_{صفر} ح^{٢}$.

ويحتاج الالكترون لغرض القفز من الفراغ لا ان يجتاز حاجزا علوه $ك_{صفر} ح^{٢}$ بل وان يكتسب طاقة السكون $ك_{صفر} ح^{٢}$ التى يفترض وجودها لديه . وبذلك فان ارتفاع الحاجز العام الذى يمنع الالكترونات الفراغية من تبادل الفعل مع الجهاز يساوى $٢ك_{صفر} ح^{٢}$.

وليست هذه بالطاقة القليلة . ويكفى القول بان الفيزيائيين تعلموا اكساب الالكترونات مثل هذه الطاقة قبل عشرين عاما فقط . وفى تلك السنوات عندما طرح ديراك فكرته حول الفراغ « المحمل فوق المعدل » لم يكن الفيزيائيون حتى يحلمون بمثل هذه الطاقات .

ولكن لماذا لا تستطيع الالكترونات تبادل الفعل مع الجهاز ، وتبقى فى الفراغ ، كما يجرى ذلك فى الفلز ؟ ويعطى الجواب على هذا السؤال مبدأ باولى مرة أخرى .



شكل ٢٢

ان أى تبادل فعل للاجسام معناه حدوث تغير فى طاقتها . ولهذا السبب بالذات واعتمادا على التغيير الجارى يمكن ملاحظة تبادل الفعل . وان الالكترون فى الفراغ يستطيع ، عند تبادل الفعل مع الجهاز ، ان يغير طاقته وينتقل الى مستوى ما آخر .

ولكن الى اين ! فان جميع المستويات فى الفراغ مملوءة بالالكترونات .

وهذا هو سبب عدم « القابلية على الكشف » عن الالكترونات الفراغية . فهى موجودة فى الفراغ وتتبادل الفعل فيما بينها ، غير انها لا تستطيع تبادل الفعل مع الجهاز . ويمكن لهذه الالكترونات ان توجد عندنا فترة طويلة من الزمن دون ان نحزر ذلك ، اذ انها لا تكشف عن نفسها ابدا .

مولد « الثقب »

لنفرض ان احد الالكترونات قد تطاير لسبب ما (سوف لا ندقق ونبحث عن ماهية هذا السبب) من الفراغ ، واكتسب الطاقة اللازمة . فبما انه اصبح حرا ، فان طاقته الكلية الآن تكون موجبة . فماذا يجرى عندئذ فى الفراغ ؟

يتكون فيه ثقب . فالمكان الذى تطاير منه الالكترون يصبح كالمتأين : فيكتسب شحنة موجبة مساوية فى المقدار لشحنة الالكترون .

ونحن نعرف هذا الثقب من حديثنا حول اشباه الموصلات. فان الالكترون هناك يقفز الى منطقة التوصيل ، ويترك ثقبا فى منطقة التكافؤ المملوءة ، وتكون شحنته سالبة . وهو تشابه جميل ، غير انه ينتهى عند هذا الحد . فالثقب فى اشباه الموصلات هو « فراغ » حقيقى ، وقد افترض وجوده من أجل وصف مختلف انواع حركات الالكترونات فى منطقة التكافؤ ومنطقة التوصيل ، بشكل مريح .

اما الثقب فى الفراغ فهو مسألة مختلفة تماما . لأن الثقب هنا لا يختلف فى شيء عن الالكترون . وهو جسيم حقيقى كالالكترون . وله ، مثل الالكترون ، طاقة سكون $\text{ك}_{\text{صفر}}\ \text{حـ}^{٢}$ ، اى طاقة تساوى بالضبط عمق اعلى مستوى للطاقة فى « الحفرة » الفراغية .

وبتعبير آخر ان الالكترون والحفرة يولدان من « العدم » الفراغى بصورة زوجية فحسب . وتصرف من اجل مولد كلا منهما الطاقة $\text{ك}_{\text{صفر}}\ \text{حـ}^{٢}$ (لان كتلتى كلا الجسيمين متساويتان) ، او $٢\text{ك}_{\text{صفر}}\ \text{حـ}^{٢}$ ، لكليهما ، كما اوردنا أنفا .

ويمكن للالكترون ان يعود ثانية الى الفراغ بعد تجواله فى « العالم الحر » . وعليه ان يجد لهذا الغرض ثقبا ثم يلتحم معه ، ويصبح « غير ظاهر » من جديد . كما يختفى الثقب ايضا .

لكن هذا ليس كل ما فى الامر . فيجب على الالكترون ، قبل ان يعود الى الفراغ ، ان يعيد الطاقة التى صرفت من أجل انطلاقه من الفراغ ، وبتعبير آخر على مولد ثقبه ، وتساوى $٢\text{ك}_{\text{صفر}}\ \text{حـ}^{٢}$.

فبأى شكل تتمثل هذه الطاقة ؟ بشكل فوتونات جاما التى لدى تطايرها من موقع التحام الالكترون بالثقب تحمل معها هذه الطاقة .

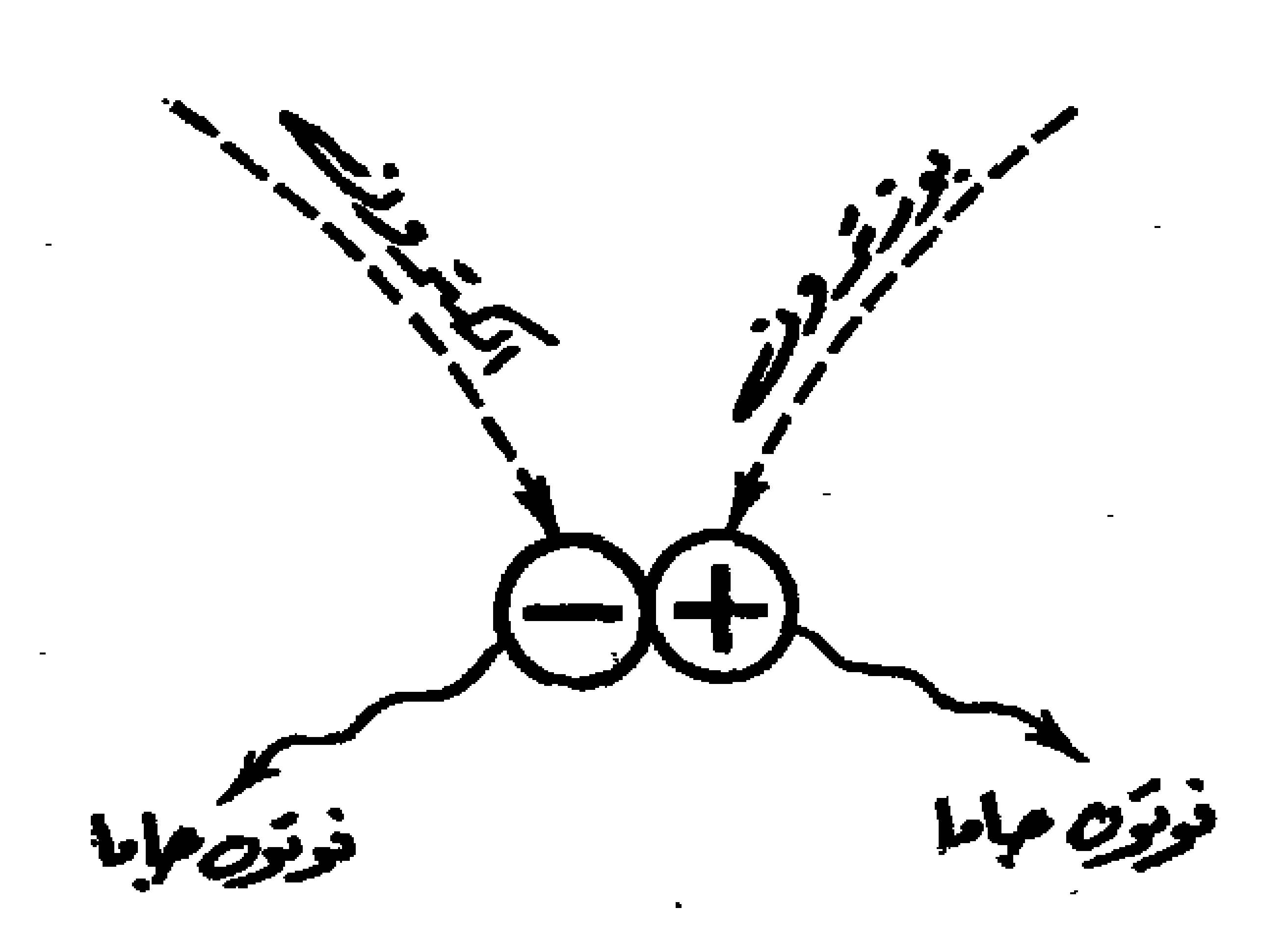
ويتبقى امامنا السؤال التالى : لماذا تحمل هذه الطاقة بشكل فوتونات جاما بالذات ؟ المسألة هى ان الطاقة التى يعطيها الزوج المؤلف من الالكترون والثقب قبل ان يدخلا « العدم » هى طاقة كبيرة جدا، حتى انها تناظر اشعة جاما الصلبة . ويتكون فوتونان جاما لا أقل (ولا تكون اكثر فى غالب الاحيان) ، لأنه يكون للالكترون والثقب الملتحمين اتجاها لف متضادان .

وهذا طبيعى ، فبما ان اللف الكلى للالكترون والثقب فى الفراغ يساوى الصفر ، فان لفيهما يجب ان « يلغى » بعضهما البعض لدى الالتحام . وفوتون جاما وحده يحتاج الى رفيق ذى اتجاه لف معاكس ، من أجل ان يكون اللف الكلى مساويا للصفر . ويتطلب ذلك قانونا الحفظ اللذان ذكرناهما من قبل .

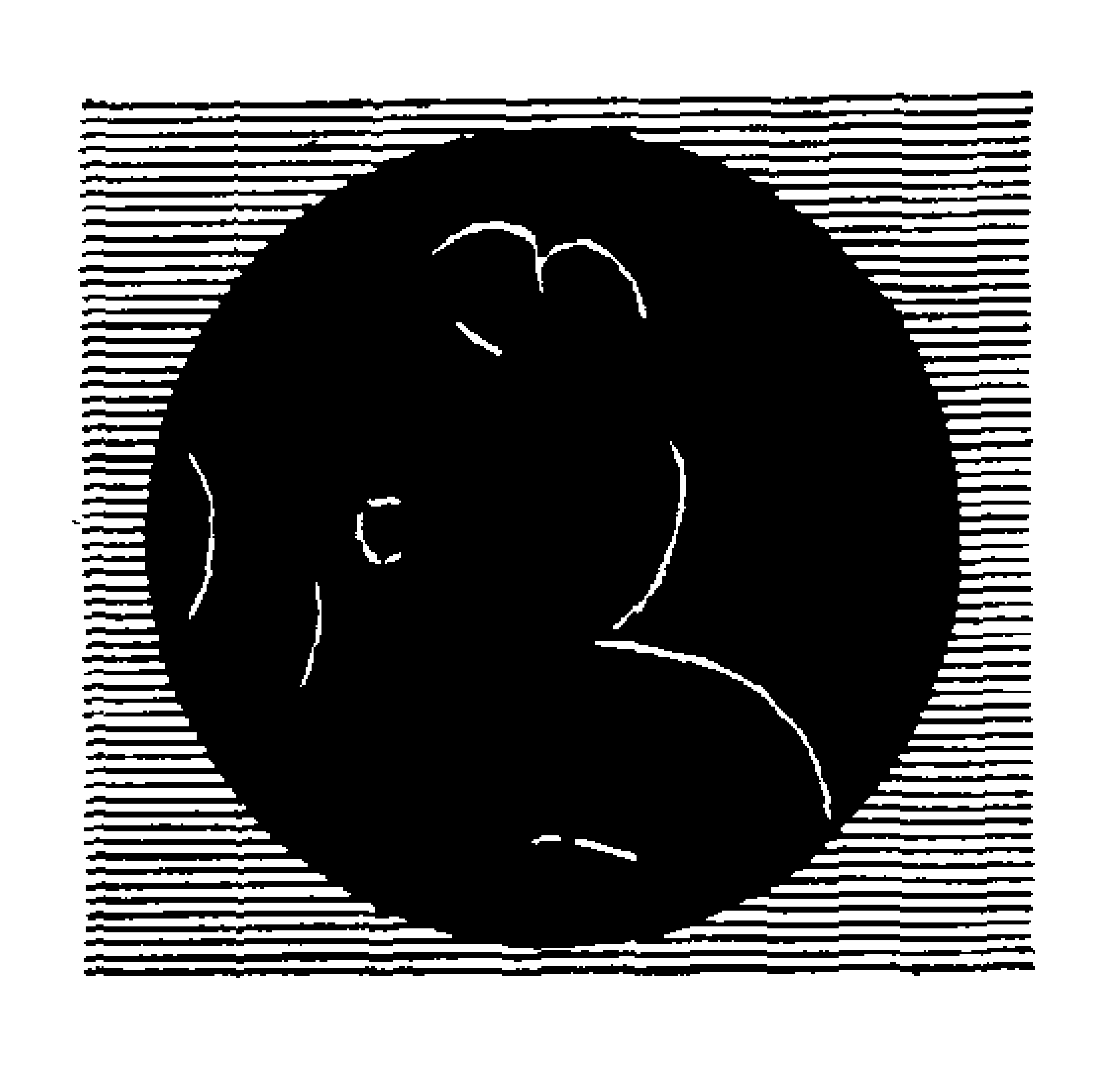
واذا وجد « جسم » ثالث بالقرب من مكان لقاء الالكترون مع البوزترون ، كالنواة مثلا ، فانها يمكن ان تأخذ لنفسها جزءا من الطاقة واللف للجسيمين الملتقيين ، وعندئذ يظهر فوتون واحد بدلا من اثنين .

حدود الفراغ

استمع الفيزيائيون الى اقوال ديراك ثم هزوا رؤوسهم . ورفض حتى المعجبين المخلصين لميكانيكا الكم اعتبار نظرية ديراك سوى



شكل ٢٣



شكل ٢٤

نكتة فيزيائية لاذعة . وكان الدفاع عن هذه النبؤة « المجنونة » يتطلب ارادة كبيرة !

ولكن مضى وقت قليل وحان اليوم الذى ادار فيه المتشككون والهازئون وجوههم خجلا . وهو اليوم الذى جرى فيه اكتشاف حمل النصر الى ديراك .

ففى عام ١٩٣٢ عثر العالم الانجليزى بلاكيت (Blackett) والعالم الايطالى اوكياليني (Occhialini) على لوح فوتوغرافى عرّض للاشعة الكونية ، على أثرين يطابقان الالكترون وجسيما آخر مجهول له نفس الكتلة وموجب الشحنة . وقد انطلق الاثران من مصدر واحد ولكن سارا باتجاهين مختلفين . وبما ان التصوير قد جرى داخل مقصورة خاصة موضوعة داخل مجال مغناطيسى فان اختلاف اتجاه الآثار قد اظهر تضاد شحنتى كل من الجسيمين .

وهكذا اعترف بوجود الثقب وسمي باسم البوزترون . وكان الجسيم هذا هو الاول فى سلسلة الجسيمات المعروفة باضداد الجسيمات (antiparticles) . وسنتحدث عنها فيما بعد .

وكانت نظرية ديراك ستحتل مكانة محترمة فى الفيزياء حتى لو اقتصرت على مجرد التنبؤ بوجود البوزترون . غير ان اهميتها اكبر بكثير . اذ كشف ديراك اعين الفيزيائيين على جوانب جديدة جدا من عالم الاشياء المتناهية فى الصغر .

ولنبدأ الحديث قبل كل شيء عن الفراغ . فهو ، برأى ديراك ، ملىء بالالكترونات التى لا تتبادل الفعل مع الجسيمات فى العالم « الفوق الفراغى » . وحالما يتطاير من الفراغ الكترون ما فيطير معه بوزترون فى آن واحد . ان هذه الجسيمات تولد وتموت بشكل ازواج .

ولكن هل نستطيع القول بان الامر على العكس ، وان الفراغ ملىء بالبوزترونات وان الالكترونات تظهر فقط لدى تطاير البوزترونات من الفراغ ؟ وقد بينت نظرية ديراك بشكلها الاصلى بان كلتا الفكرتين ممكنتان تماما على قدر المساواة . لكننا مع ذلك نضع فى المرتبة الاولى فكرة ان الفراغ ملىء بالجسيمات لا باضداد الجسيمات .

وفى الواقع اننا نلاحظ الالكترونات كثيرا جدا ، بينما ان البوزترون هو ضيف نادر فى عالمنا . ويبدو اننا سنستنتج من ذلك ان عدد البوزترونات فى العالم اقل بكثير من عدد الالكترونات . لكن نظرية ديراك تشير الى ان الجسيم يظهر بشكل زوجى مع ضديده

فقط . وهذا يعنى بان عدد الالكترونات والبوزترونات فى العالم واحد .

ويا له من شيء غريب ! ومما يزيد الامر غرابة هو وجود العالم ووجودنا نحن بعد كل ذلك . فليس هناك ما يمنع ، فى الواقع ، ان تلتقى جميع الالكترونات بالبوزترونات ، ثم تغوص فى الفراغ ، ولا يتبقى من كل ذلك سوى فوتونات جاما .

لكن احتمال التقاء الالكترون بالبوزترون ضئيل جدا ، من أجل تكون مثل هذه الصورة المتشائمة التى تهدد العالم بالتحول الى الفراغ . وهذا يعنى ان عدد البوزترونات هو ، بالرغم من ذلك ، اقل من عدد الالكترونات ! فالى اين تذهب ؟

قد يعتقد المرء بان الطبيعة عملت كل ما تستطيع من اجل ابعاد البوزترونات والالكترونات عن بعضها البعض . وهى فكرة شائعة لدى كتاب الروايات الخيالية وبعض العلماء . وهم يعتقدون بانه توجد فى الكون الشاسع ، عوالم « مرآوية » شبيهة بعالمنا وتتألف من اضداد الجسيمات . وتسود فى هذه العوالم البوزترونات بشكل خاص ، بينما تكون الالكترونات فيها مجرد ضيوف عابرة .

ويبرز امامنا سؤال آخر . اذا كان للالكترون ضديد ، فلم لا يكون للبروتون ضديد ايضا ؟ عندئذ يجب ان يكون هناك فراغ من البروتونات ! وان يكون لكل جسيم ، بشكل عام ، ضديد ، وفراغ خاص . ويكون الفراغ ممتلئا حتى الثمالة بالنيوترونات والنيوترينو والميزونات .

ويا له من فراغ ! انه اشبه ما يكون « بحفرة جماعية » لكل الجسيمات التي لم تولد بعد ولكل الجسيمات الميتة .

انه شيء مؤثر حقا ! لكنه ، ان امكن التعبير ، « ضخم » نوعا ما . وهذا حق ، فبعد مضي بعض الوقت تخلى الفيزيائيون عن فراغ ديراك وابدلوه بتصورات اكثر « لطافة » . وسيجيء دور الحديث عنها فيما بعد :

لا تستطيع الجسيمات الخروج من هذه الحفرة الا بصورة زوجية ، وبعد ان تحصل على طاقة كافية لهذا الغرض . واولى الجسيمات التي تخرج هي الخفيفة — النيوترينو والالكترونات . اما بالنسبة للبروتون وضديد البروتون فان الطاقة اللازمة يجب ان تكون اكبر بحوالي الف مرة ، على اكبر تقدير ، منها بالنسبة للالكترون والبوزترون . وكلما كان الجسيم اكثر ضخامة و « صعوبة في الحركة » كلما اصبح خروجه من الفراغ اصعب .

الفراغ ... هل هو مكان فارغ ؟

نعرف الآن انه عندما يختفي زوج يتألف من الكترون وبوزترون تتولد فوتونات جاما للطاقة . ولكن لم الفوتونات بالذات ، وليس غيرها ؟ ان هذا شيء لا نعرفه بعد .

... عندما نضرب كرة بليارد باخرى فيتمثل تبادل الفعل في انطلاق احدى الكرتين باتجاه معين ، بينما تبدأ الثانية بالحركة .

ولكن حاول تحريك كرة ساكنة من مكانها بامرار كرة اخرى دون ان تمسها ! ولنأخذ مثالا آخر ، قد يبدو مجرد تصوره امرا يبعث على الضحك ، وهو مثل الحصان الذى يحرك عربة دون ان يكون مربوطا اليها او يمسها !

وفى هذين المثالين يتم تبادل الفعل بين الاجسام بمجرد ان يمّس احدها الآخر . ولا يهم ان كان زمن تبادل الفعل قصيرا (كما فى حالة تصادم كرتين) او طويلا (كما فى حالة ربط الحصان الى العربة) . فالاجسام ذات الفعل المتبادل تكون فى اتصال خلال الحالتين .

ولكن هناك شكل آخر لتبادل الفعل بين الاجسام . فالتفاحة تسقط على الارض لدى قطعها من الشجرة . ويجذب المغناطيس برادة الحديد اليه . والكرات المكهربة تتجاذب او تتنافر . وان كلمة « التجاذب » نفسها تبين بان الاجسام « تبدأ » تبادل الفعل وهى موجودة على مسافة معينة عن بعضها البعض .

فهل ينتقل تبادل الفعل هذا عبر الهواء ؟ لقد بينت التجربة ان ذلك غير وارد . فالارض تجذب القمر والشمس تجذب كلاهما ، بالرغم من وجود فراغ بينها عمليا . وتجذب نواة الذرة الالكترونات بالرغم من وجود فراغ مطلق بينها . وهذا يعنى بان الاجسام تستطيع ان تتبادل الفعل فيما بينها دون ان يمّس بعضها البعض .

وقد اطلق الفيزيائيون قبل مئة عام على مناطق الفضاء التى يلاحظ فيها هذا النوع من التأثير بالمجال . لكنهم لم يعتقدوا بان هذا الفضاء يمكن ان يكون فارغا تماما .

كلا ، لا يمكن حدوث تبادل فعل بدون وسط بينى ! ولابد من وجود هذا الوسط . وعلى هذا الاساس فقد استحدثوا « الاثير » الشيء الرقيق للغاية الموجود فى الفراغ واعتبروه الوسط المذكور .

وقد حاول الفيزيائيون خلال عدد من السنين ادراك صفات الاثير ، وهى صفات غريبة جدا بل وحتى تناقض احداها الاخرى ، كما اوردنا ذلك فى بداية الكتاب .

واخيرا تم فى نهاية القرن الماضى توجيه ضربة قاصمة لفكرة الاثير ، بعد اجراء التجارب على الضوء . وبعد مرور عدة سنوات اظهرت النظرية النسبية لاينشتين كل سخف محاولات بعث الاثير باى شكل من الاشكال .

وهكذا انهارت فكرة الاثير دون ان يحل محلها شيء . واستسلم الفيزيائيون للواقع ، واعترفوا بان تبادل الفعل بين الاجسام يجرى مبدئيا فى الفراغ التام . ولكن كيف يمكن للفراغ ان ينقل الفعل المتبادل ؟ ان الجواب على هذا السؤال كان فوق مستوى اذكى العقول . فالفراغ هو الفراغ .

حقا من الصعب الخروج عن التصورات المعتادة للاشياء كلما كانت اكثر تجاوبا مع المنطق السليم . فهل يثير اية شكوك لدى

الناس ، مثلا ، القول بان الفضاء يضم داخله جميع الاشياء ؟ ان هذه الفكرة تبدو بسيطة كالهواء ولا تقبل الشك .

وهناك جزء من الفضاء تشغله المادة . وقد سمى هذا الجزء بالجسم والجسيم وغير ذلك من الاسماء الكثيرة . وهل يوجد جزء من الفضاء لا تشغله المادة . ويسمى هذا الجزء بالفراغ او الفراغ المطلق (vacuum). ولا يوجد هذان الجزءان سوية ابدا . والفراغ لا يؤثر على الاجسام ، والاجسام لا تؤثر على الفراغ ايضا . صحيح ، ان الاجسام قد يؤثر بعضها على البعض الآخر عبر الفراغ ، لكن الفراغ فى هذه الحالة ليس طرفا ثالثا ، فتبادل الفعل يقتصر على الاجسام وحدها .

الفراغ يعتمد على الاجسام

ثم ظهر شخص لم يعلن تشككه فى هذا المفهوم الشائع فحسب ، بل واعاد النظر فيه بصورة جذرية . وكان ذلك البرت اينشتين ونظريته النسبية العامة . وقد تحدثنا سابقا عن نظريته الاولى ، وهى النظرية النسبية الخاصة ، المكرسة للحركة السريعة للاجسام . اما النظرية النسبية العامة فهى تتناول بالبحث قضية اكثر اتساعا بكثير . ويمكن التعبير عنها باختصار بانها العلاقة بين الاجسام والفضاء .

والفكرة الاساسية فى هذه النظرية تتألف من التأكيد على ان

المادة تؤثر فى الفضاء المحيط بها . فان الفضاء المنسجم تماما عند انعدام وجود الاجسام فيه (ان هذا ممكن افتراضا فقط) يفقد انسجامه عند « ادخال » ولو جسم واحد فيه .

فكيف يتجلى ذلك ؟ وكيف يقاس عدم التجانس هذا ؟ وقد أخذت الهندسة على عاتقها القيام بهذه المهمة .

ان الهندسة فى الفضاء الفراغى هى نفس الهندسة المدرسية التى اوجدها العالم الرياضى اليونانى القديم اقليدس . وبموجب احكامها يعتبر المستقيم اقصر مسافة بين نقطتين ، وان الخطين المتوازيين لا يلتقيان ابدا . كما تضم عددا من البيانات « الواضحة للعيان » وتسمى بالبديهيات ، اى الفرضيات التى لا تتطلب لوضوحها اى اثبات (وهو ، بالمناسبة ، امر مستحيل التحقيق) .

ولكن حدث فى بداية القرن الماضى ان اعلن عالم روسى عبقرى هو لوباتشيفسكى عن تشككه فى صحة احدى هذه البديهيات (الخاصة بالخطوط المتوازية) . واثبت بانه اذا ما استغنى المرء عن هذه البديهية فيمكنه تكوين هندسة غير متناقضة داخليا ، كالتى اوجدها اقليدس ، لكنها تناقض المنطق السليم فى جوهرها . وكانت الهندسة التى اقترحها لوباتشيفسكى غير عادية ومتناقضة مما جعلها غير مفهومة من قبل الجميع . وبقيت مؤلفات لوباتشيفسكى الرائعة عشرات السنين مهملة على رفوف المكتبات الجامعية ، العتيقة التى لا تنالها اليد .

لقد بدت غريبة لمعاصرى لوباتشيفسكى افكاره فى انه لا توجد اية هندسة « عموما » تصح بالنسبة لجميع العوالم ، وان اية هندسة تتحدد بصفات اجسام معينة ، وان هندسة الفضاء تتوقف على نوع الاشياء الموجودة فيه وكيفية توضعها . وان الانسان اذا ما اعاد النظر فى وضع الاشياء يستطيع تغيير هندسة العالم الوحيدة التى وجدت منذ الازل !

ولقد وجدت هذه الافكار مكانة لائقة فى اعمال اينشتين . فما دام لا يوجد فضاء بدون اجسام فلا يوجد اذن فضاء متجانس . وفى الفراغ المحيط بالاجسام لا يعتبر الخط المستقيم اقصى مسافة بين نقطتين بصورة عامة بل الخط المنحنى المسمى بالجيوديسى (geodesic) . ويزداد انحناء هذا « المنحنى » كلما اقتربت نقطتى نهايتيه من الاجسام وكلما ازداد حجم هذه الاجسام ضخامة .

فكيف نستطيع التيقن من ذلك ؟ ستساعدنا فى ذلك اشعة الضوء . ان « انحناء » الفضاء بواسطة الاجسام ضئيل جدا ولا يلاحظ تقريبا فى الظروف الاعتيادية . ويجب القيام بتجربة فى الفضاء بين النجوم ، واختيار جرم كبير جدا ، كالشمس مثلا ، باعتباره « مسبب الانحناء » . ومن الطبيعى ان يكون من السهل بالنسبة لنا مراقبة الخط الذى نعتبره مستقيما . فان هذا الخط الذى يحدث شعاع الضوء يجب ان يكون مستقيما اذا ما صدقنا الفيزياء الكلاسيكية وهو ما يريد انكاره اينشتين بالذات .

لنوجه عدسة التلسكوب نحو احد النجوم ثم نصوره . ثم نصور بعد ذلك هذا النجم عندما تكون اشعاعات ضوءه تمر بالقرب من الشمس . وبما ان النجوم لاترى عند وجود الشمس فينبغي اجراء التصوير الاول ليلا ، والثاني عند حدوث كسوف الشمس التام .

وحسب قوانين الفيزياء الكلاسيكية فان صورتي النجم يجب ان تكونا في نفس المكان من اللوح الفوتوغرافي . وانه الامر سيان بالنسبة لضوء النجم فيما اذا مرّ قريبا او بعيدا عن الشمس . وحسب النظرية النسبية العامة فان مسار الضوء قرب الشمس يجب ان ينحني . وان شعاع الضوء يجب ان يغير من اتجاهه قليلا عند مروره بالقرب من الشمس ، لذلك يجب ان تكون صورة نفس النجم على اللوح الفوتوغرافي منزاحة بالنسبة للصورة الاولى .

وفي اغسطس عام ١٩١٩ ذهبت الى الصحراء العربية بعثة خاصة لمراقبة الشمس اثناء الكسوف التام . وفي الوقت نفسه وضعت لها هدفا اختبار فرضية اينشتين . وبعد مرور عدة ايام على حدوث الكسوف حمل التلجراف نبأ مثيرا فقد اظهرت دراسة الصور الفوتوغرافية وجود الانحناء في الفضاء ، وبنفس الشكل الذى افترضه اينشتين بالضبط .

ومنذ ذلك الحين بدأت نظرة الفيزيائيين حول الفراغ تتغير بصورة جذرية . وتبين بان الفضاء يحتوى لا على اجسام فقط ، بل وعلى مجالات ايضا .

ما هو المجال ؟ يطلق الفيزيائيون هذه اللفظة على قطاع الفضاء الذى يظهر فيه تبادل الفعل بين الاجسام . ولكن لا توجد اجسام لا تتبادل الفعل ، فجميع الاجسام تتألف من جسيمات لا تقف موقف اللامبالاة من احدها الآخر .

لذلك فان المجالات توجد دوما وابدا وفى كل مكان . وهى توجد لا بين الاجسام فقط بل وداخلها ايضا ، كما وتوجد فيها فراغات لا تملؤها المادة . وهذه هى الصفة الاولى والرئيسية للمجال . ومن هنا نصل الى استنتاج آخر : فالمجال واقعى وعام مثل المادة نفسها .

لكن المجال يختلف عن المادة . فالمادة « ذات وزن ويمكن رؤيتها » ، اما المجال ، كالمجالات الكهربائية والنووية والمغناطيسية ، فلا يمكن رؤيتها . غير انه لا يجوز القول بان المجال غير محسوس . اذا اننا بمجرد مراقبة سقوط تفاحة على الارض ، نلاحظ تأثير المجال على حركة احد الاجسام .

وهناك ظاهرة اخرى يلاحظ فيها وجود المجال ، وهو الضوء « بنفسه ولوحده » . فمنذ القرن الماضى ثبت بان الضوء هو مجال كهرومغناطيسى خاص .

واوجد اينشتين فى نظريته حول ظاهرة التحول الكهروضوئى

مفهوم الفوتون . وكان ذلك مفهوما فى غاية الاهمية . فقد تبين بان المجال الكهروضوئى مكمّا (quantized) ، اى يوجد بشكل جسيمات منفردة هى كمات المجال . وهذه الكمات هى الفوتونات نفسها .

ثم تطور تاريخ المجال . فاثبت العالم ستوليتوف (Stoletov) عام ١٨٧٦ بان الضوء يمكن ان يحدث تأثيرات تتصف بها المواد بطرده الالكترونات من الفلز . كما اكتشف ليبيديف فى عام ١٩١٢ ان الضوء يحدث ضغطا على الاجسام ، كما لو كان تيارا من جسيمات « حقيقية » ، وذات كتلة .

وكانت هاتان التجربتان الهامتان وكذلك مفهوم الفوتون فاتحة الدرب الذى قاد الى استنتاج ان المجال الكهرومغناطيسى له صفات المواد فى آن واحد ، وان كمات المجال لها خصائص جسيمات المادة .

وكان ذلك الباع الاول فى الجسر المقام على الهوة التى بدا انها تفصل بين المادة والمجال . هذا وتقوم نبوءة دى برويل باتمام بناء الجسر من الطرف الآخر . فيمكن للالكترونات ان تكتسب صفات الموجات . وبتعبير آخر ان المادة يمكن ان تظهر بشكل مجالات .

ويمكن للمجال ، الذى لا حدود ولا ثقل له ، ان يكون ذا ابعاد ووزن .

وان المادة التى لها حدود فى الفضاء وثقل يمكن ان تكون عديمة الابعاد والوزن .

فهل يعنى ذلك باننا يجب ، بدلا من اعتبار المادة والمجال ضدين متناقضين كالسابق ، ان ندمجهما سوية فى وحدة لا تنفصم ؟ كلا . ان الصفات المادية للمجال تظهر باجلى اشكالها عند الطاقات الكبيرة لكماته . بينما تظهر صفات المجال للمادة بشكل حاد فقط عندما تكون طاقات جسيماته كبيرة .

اما عندما تكون الطاقات صغيرة ؟ عندئذ يبدو المجال بصورة اساسية كمجال ، والمادة كمادة .

هل ينعدم الفراغ !

لم يكن العثور على مولد الالكترون والبوزترون سوية على اللوح الفوتوغرافى ايذانا « باكتشاف » الفراغ فحسب . فقد جرى آنئذ ، ولاول مرة ، على مرأى البشر تحول المجال الى مادة . وسرعان ما اثبت عكس نظرية ديراك : وهو فناء الالكترون والبوزترون سوية عند لقائهما ، ومولد فوتونى جاما فى اللحظة .

وقد يتساءل القارئ : « لكن ، مهلا . ما هو التحول الذى تتحدثون عنه . فا لالكترون والبوزترون لم يتحولا الى اى شىء ، فهما اختفيا فى الفراغ دون تغير فى الشكل . بينما أتخذت الطاقة التى اعطياها شكل فوتونات جاما . فالشىء الذى حدث هو نفسه

الذى يجرى فى الذرة عندما يقفز الالكترون من مستوى اعلى الى مستوى ابطأ للطاقة ، ثم يمنح جزءا من طاقته بشكل فوتون . اما هو نفسه فيبقى بشكل الكترون ! »

لكن واقع الحال ليس كذلك تماما . فالفراغ المطلق والفراغ يظهر هنا بشكله المجالى الرئيسى . وفى الحقيقة ان الالكترون فى الذرة يستطيع دائما منح جزء من طاقته وليست الطاقة باجمعها . كما وانه يستطيع حتى فقدان كافة طاقته الكينماتية كلها فى الحركة الحرة ، ويتوقف ، لكنه لا يعطى ابدا طاقته الذاتية « الرئيسية » مهما كانت الظروف، وذلك اذا لم يرغب الالكترون فى البقاء كالكترون .

فان منح الطاقة $ق_{صفر} = ك_{صفر} ح^{2}$ المرتبطة بشكل وثيق بكتلة السكون $ك_{صفر}$ ، يعنى فقدان كتلة السكون ، اى فقدان جوهر الجسيم ! ولقد بينا بان الجسيمات تختلف عن كمات المجال الكهرومغناطيسى فى كونها تستطيع البقاء فى حالة السكون ، وتكون كتلتها عندئذ لا تساوى الصفر .

وهذا يعنى بانه عندما يغوص الالكترون فى الفراغ يمنح سوية مع البوزترون طاقته الذاتية ، ويفقد صفته آنذاك كالكترون ، وكذلك البوزترون يفقد صفته كبوزترون . ومن الطبيعى ان كتلتهما لا تزول دون ان تخلف اثرا ، وكذلك الحال بالنسبة لطاقتهما . فان الكتلة تغير طبيعتها وتصبح غير مادية ومجالية ، اما الطاقة الذاتية فتتحول الى طاقة كمات المجال اى فوتونات جاما . فهل نستنتج من ذلك انه

لا توجد فى الفراغ الكترونات « حقيقية » ابدا ، وانها توجد هناك بصورة افتراضية ، اذا امكن التعبير ، اى احتمالية ؟

نعم . لان الفراغات المطلقة والفراغات الخالية لا توجد فى اى مكان مطلقا . فهناك فقط مواد ومجالات تملأ الفراغ كله . والفراغ الذى كان يقصده ديراك هو مجرد صورة توضيحية تساعد على تصور عمليات التحول المتبادل لجسيمات المادة وكمات المجال بشكل اكثر وضوحا .

ان المؤلف لم يرد ارغام القارئ على السير معه طويلا كما قد يظن الاخير . فقد كان من الواجب ان نبدأ حديثنا من الفراغ « الاعتيادى » من اجل ان نجعله « غير اعتيادى » ثم نزيله فى النهاية من الوجود تماما . وهذا هو سبيل التطور الطبيعى للعلم .

يتحول الالكترون والبوزترون لدى لقائهما الى فوتونات جاما . فاذا صح ذلك فمعناه ان العكس ممكن ايضا ، اى عندما تولد الفوتونات نفسها الجسيمين المذكورين ؟ نعم ، هذا صحيح تماما — اذا ما وجدت للفوتونات طاقة كافية ، تساوى ٢ كصفر حـ٢ لفوتونين ، على اقل تقدير .

يمكن مراقبة الفوتونات وتسجيلها فهى محسوسة . بينما الفراغ غير محسوس ، الى ان يقفز منه الالكترون والبوزترون . فكيف نوفق بين الحالتين ؟

فى الواقع ان الامر لا يحتاج الى اى توفيق . فالفوتونات تسجل بصفتها فوتونات مادامت طاقتها غير كبيرة . لكن ما ان تصبح بدرجة

كافية لتحول زوج من الفوتونات الى زوج من الجسيمات حتى تبدأ الصفات « الفراغية » للفوتونات بالظهور . ويمكن لزوج الفوتونات ان يختفى ، ويظهر مكانه الالكترون والبوزترون .

ان « الفراغ » فى حقيقته هو امكانية التحول المتبادل لجسيمات المادة الى كمات المجال وكمات المجال الى جسيمات . وهذا هو اهم شيء بالنسبة لنا فى الوقت الحاضر . وكل حديثنا يتركز على هذا الموضوع منذ بداية الباب .

ويبدو ان كل شيء قد اصبح واضحا بهذا القدر او ذاك وبما انه يجرى مدّ جسر بين المادة والمجال فانه يمكن ان تحدث فى جانبى الجسر حركة نشيطة : ويمكن ان تنتقل الجسيمات عبر الجسر وتتحول الى كمات المجال ، وكمات المجال تتحول بدورها الى جسيمات . والمهم هو صعود هذا الجسر ، وهو عال جدا ، اذ يبلغ ارتفاع طاقته ٢ ك$_{\text{صفر}}$ ح^{٢} ، وهو يساوى بالنسبة للالكترونات ملايين الالكترون فولت ، وبالنسبة للبروتونات مليارات الالكترون فولت .

وهكذا يحتل المجال مكان الفراغ . وبالنظر لوضوح صورة الفراغ الى درجة كبيرة فاننا سنواصل فى المستقبل استخدام هذا التعبير فى غالب الاحيان . وسنصوره ، كالسابق ، بشكل « محيط » شامل ، تقفز منه ثم تغوص فيه ثانية بعد مضى فترة من الوقت الجسيمات ــ الدلفينات (الدرافيل) .

على اى شيء تقف الحيتان ؟

ونستطيع في النهاية ان نشرح احد الحيتان الذى تقف عليه ميكانيكا الكم « المنقاة » . وعدد هذه الحيتان كما جاء في الروايات القديمة هو ثلاثة : فرضية بلانك حول الكمات ، والنظرية النسبية لاينشتين ، وفرضية دى برويل حول الطبيعة الموجية للجسيمات. وسنتحدث الآن عن الفرضية الاخيرة .

الا يبدو للقارئ ان ما اوردناه اعلاه يعتبر انتقالا سريعا وليس له ما يبرره من النظرية النسبية العامة ، التى وضعت للعوالم الضخمة ، وعلى مستوى الافلاك ، الى عالم يتميز بكون ما فيه متناه فى الصغر ؟ ولقد أكدنا اكثر من مرة بان القوانين التى تصح بالنسبة للعوالم من مستوى معين تصبح غير مضبوطة ، وفى احسن الاحوال ، بالنسبة للعوالم ذات المستويات الاخرى . فبأى حق قمنا بنقل العلاقة بين المادة والفضاء التى اوجدها اينشتين الى عالم الاشياء الصغيرة !

لقد أعطتنا هذا الحق فرضية دى برويل التى جرى اختبارها جيدا واثباتها . تتصف الجسيمات الدقيقة بصفات موجية . ويلاحظ ازدواجها هذا دائما وفى كل مكان . ولكن ما هى الموجة ؟ انها من حيث صفاتها فى الامتداد دونما حدود ، وفى الحركة الدائمة ، هى شيء موجى . وهكذا فان فرضية دى برويل تبين فى الواقع ان للجسيمات المادية صفات موجية . وهى بذلك تكمل فرضية بلانك ـ

اينشتين في ان كمات المجال ـ الفوتونات ـ ذات صفات مادية .

فبأى شكل تظهر الصفات الموجية للجسيمات الدقيقة ؟ لقد بينا ذلك فى امثلة كثيرة . ومن اكثر هذه الصفات تميزا هو تلطخ الالكترونات والجسيمات الاخرى فى الفضاء . ويقول الفيزيائيون عن ذلك بانه لا موقعية الجسيمات . فا لالكترون موجود هنا وغير موجود فى آن واحد . ولدى محاولة قياس سرعة حركته بدقة مطلقة ، فاننا لا نستطيع قول اى شيء عن موقعه . وهذه صفة نموذجية للمجال الذى لا يمكن تحديد موقعه ابدا لانه موجود فى كل مكان .

وعند زيادة سرعة حركة الالكترون فانه يصبح ، عند اقتراب هذه السرعة من سرعة الضوء ، « اثقل » اكثر فاكثر . فمن اين له بالكتلة الاضافية ؟ ان الالكترونات تتسارع عادة فى المجال الكهربائى . ويدخل المجال اثناء التسارع فى الالكترون ثم يمنحه جزءا من طاقته . وبما ان طاقة الالكترون تزداد باستمرار ، فانه يجب اعتمادا على علاقة اينشتين (التى اوردناها فى ص ٣٠٧) ان تزداد سرعته وكتلته .

لكن عملية « ضخ » الكتلة من المجال الى الجسيم لا يمكن لن تستمر الى ما لانهاية . وتزداد الكتلة بسرعة كبيرة جدا ، واخيرا ، تتساوى الطاقة الكينماتية للجسيم مع طاقته الذاتية (ويحدث ذلك عندما تبلغ سرعة الجسيم حوالى ٨٠ بالمئة من سرعة الضوء) . وعند ذلك

تحدث عملية جديدة تتجلى فيها الصفات الموجية والمجالية للجسيمات بشكل اكثر وضوحا . وتتوفر للجسيمات امكانية التحور فورا من الطاقة المتراكمة والطاقة الذاتية وتتحول الى مجالات كمّ .

ان سبب ازدياد كتل الجسيمات لدى ازدياد سرعتها هو نوع من غريزة حفظ الذات ، ويكمن فى طبيعتها . ولا ترغب الجسيمات فى فقدان ذاتها الفردية وتقاوم زيادة طاقتها بعنف يتضاعف باقتراب احتمال التحول الى المجال .

ولا تستطيع الجسيمات ابدا الحركة بسرعة المجالات المنتشرة . بينما لا تستطيع المجا لات الانتشار بسرعة اخرى غير هذه .

الجسيمات تغير هيئتها

تناولنا فى الحديث عن تحول الجسيمات الى الآن الالكترون فقط (والبوزترون طبعا) . وقد اتضح بعد اكتشاف النيوترون انه هو الآخر يستطيع التحول ، ولكن بشكل يختلف عن الالكترون ، اذ يتحول الى مجا لات كمّ بل جسيمات اخرى .

فاولا يتحول النيوترون الى بروتون والكترون ونيوترينو (عند حدوث انحلال بيتا) ، ويشترط لذلك ان يكون حرا . ويتحول النيوترون فى النواة الى بروتون وميزون ــ باى . وقد وجد فيما بعد ان التحول الثانى للنيوترون لا يختلف كثيرا عن التحول الاول ، وينحل ميزون ــ باى الحر الى ميزون ــ ميو ، الذى هو اخف منه

بمقدار الربع ، والى نيوترينو . وينحل ميزون - ميو بدوره الى الكترون ونيوترينوين اثنين . فيكون لدينا :

١) انحلال النيوترون الحر :

نيوترون ← بروتون + الكترون + نيوترينو

٢) انحلال النيوترون « النووى » :

نيوترون ← بروتون + ميزون - باى

ميزون - باى ← ميزون - ميو + نيوترينو

ميزون - ميو ← الكترون + ٢ نيوترينو

وتكون النتيجة : نيوترون ← بروتون + الكترون + ٢ نيوترينو + ضديد النيوترينو. لكن هذا الحساب الرياضى فى التشابه بين التحولين يفقد قيمته الى حد كبير لعدم انحلال ميزون - باى فى الذرة . ونحن نعلم بانه تؤثر فى النواة بين الجسيمات ، اضافة الى القوى الكهربائية ، القوى النووية ، التى هى اكبر من الاولى بكثير . وتضمن هذه القوى استقرار النوى .

وهذا النوع الجديد من القوى يعنى مجالا جديدا . واذا ما وجد مجال جديد فان له كماته . وتقوم الفوتونات بدور ناقلات تبادل الفعل الكهرومغناطيسى . وبالمثل فان ناقلات تأثير تبادل الفعل النووى يجب ان تكون ميزونات - باى (وقد بينا بان ميزونات - باى تتبادل الفعل بصورة ضعيفة مع النوى ، لذلك فهى لا تستطيع ان تكون كمات للمجال النووى) .

وهكذا فان ميزونات – باى هى كمات المجال النووى . لكن هذه الكمات تختلف عن الفوتونات فى كونها ذات كتل استقرار لذلك فهى بارزة جدا فى عالم الاشياء المتناهية فى الصغر : فهى اضخم من الالكترونات بثلاثمائة مرة تقريبا ! وبما ان الامر كذلك ، فان ميزونات – باى لا تستطيع الحركة بسرعة الضوء . ولذا فنحن امام الكمات مرة اخرى ! وكنا نظن بانها جسيمات لا كمات ، ولكن ظهر مع ذلك بانها كمات ! وبذلك فان الصورة المتناسقة للعلاقات المتبادلة بين المجال والمادة ، التى رسمها الفيزيائيون قبل فترة وجيزة ، قد تحطمت .

وظهر بان ميزونات – باى هى اقصى حد للازدواج (الثنائية) . ويربطها بالمادة كون كتلة سكونها تساوى الصفر ، وبالمجال كون لفها يساوى الصفر .

ولنتأمل هذه الناحية قليلا . فان الفيزيائيين اثبتوا بعد ظهور ميكانيكا الكم وجود فرق آخر بين جسيمات المادة ومجال الكم . وهو فرقهما فى اللف . فقد تبين بان الجسيمات « الحقيقية » للمادة تكون ذات لف واحد فقط يساوى نصف ثابت بلانك h (وبتعبير ادق $h/\pi ٤$) ، بينما يجب ان يكون لمجال الكم لف اما يساوى الصفر ، واما يساوى العدد الكلى لثوابت بلانك ($h/\pi ٢$) .

وهناك تبرير تام لان يظهر اللف هذا الفرق الكبير فى جوهر الجسيمات والكمات . لانه وجد بان مقدار اللف يؤثر تأثيرا اساسيا على سلوك الاشياء الدقيقة .

ولنسترجع مبدأ باولى فى اذهاننا . فانه ينص على عدم امكانية وجود الكترونين فى مجموعة ، فى ظل ظروف متشابهة تماما . وفى الحقيقة ان ذلك ينطبق لا على الالكترونات فقط ، بل وعلى البروتونات والنيوترونات وبشكل عام اية جسيمات ذات نصف لف .

اما بالنسبة للجسيمات التى يبلغ لفها الصفر او ذات لف تكاملى فلا ينطبق هذا المبدأ . وهذا هو الواقع . فمثلا يمكن ان يوجد فى « مجموعة » من الفوتونات (و« اخوتها » ــ الكون باجمعه !) عدد غير محدود من الفوتونات المنفردة ، اى ان لها نفس التردد ، ونفس اتجاه اللف (لف الفوتون يساوى وحدة واحدة) .

وبالمناسبة فانه يظهر من تقسيم اشكال اللف هذا بان ميزون ــ ميو الذى جابه الفيزيائيين قبل غيره لا يمكن باى حال ان يكون كما للمجال النووى . لان له نصف لف . لكن لجميع ميزونات ــ باى لف يساوى الصفر ، لذا يمكن استخدامه كمجال للكم . اما كتلة السكون لها والتى لا تساوى الصفر ...

ميزون ــ باى ذو الوجهين

كانت تلك مفاجأة كبرى حقا بالنسبة للفيزيائيين . ودعنا نستعرضها الآن .

ربما يكون النيوترون مجرد مركب « مضغوط » يتألف من بروتون

وميزون ــ باى ؟ كلا . فان الرياضيات البسيطة ترينا بان كتلى السكون للنيوترون والبروتون تساوى على التوالى (بصورة تقريبية) ١٨٣٩ و١٨٣٦ من كتل الالكترون، وكتلة السكون لدى ميزون ــ باى هى ٢٧٣ . وهذا يعنى بان النيوترون عندما يبعث ميزون ــ باى فانه يجب ان « يضعف » او ينقص الى ٢٧٣ ، لا الى ٣ كتل الكترون كما هو الحال فى واقع الامر .

ولا تبرز هذه المشكلة عند انحلال النيوترون الحر . ان النيوترون يفقد الكترونا اى كتلة الكترون واحدة . وبالاضافة الى ذلك فانه يكسب الالكترون والنيوترينو اثناء التحليق ضعف الطاقة الحقيقية للالكترون ، وبعدها يكتسب كتلة البروتون . وفى حالة ابتعاث ميزون ــ باى فان النيوترون يفقد من الكتل كمية تزيد بمئات المرات تقريبا . لكننا لا نلاحظ ذلك لسبب ما . فلم تتسن ابدا ملاحظة ضمور النيوترونات بعد تكون ميزونات ــ باى . فكيف يتم ذلك ؟

تصور الحالة الآتية : اذ يقوم النيوترون باقتلاع ميزون سالب الشحنة منه ويرميه الى البروتون . فليتقطه هذا ويحوله فورا الى نيوترون . فيتحول النيوترون « لاعب الهجوم » الى بروتون خفيف ، اما البروتون « حامى الهدف » الذى التقط الميزون فيصبح نيوترونا ثقيلا . وبعد مرور فترة قصيرة من الزمن يقذف النيوترون الثقيل الميزون الذى حصل عليه سابقا ، فيتحول فورا الى بروتون اعتيادى ، بينما يصبح البروتون الخفيف الذى التقط هذا الميزون الى نيوترون اعتيادى . وبذلك

نرى ان « لعبة تقاذف الكرة » تتألف من مرحلتين غير متكافئتين في القيمة : الاولى تحرمها كافة قوانين الفيزياء بشكل صريح ، والثانية مسموح بها تماما .

وينبع التحريم من كون انه ليس هناك من جسيم يمكن ان يتواجد بكتلة تقل عن كتلة سكونه ، بينما حصلنا آنذاك على بروتون خفيف . ويمكن صياغة ذلك بتعبير آخر . ان النيوترون « لاعب الهجوم » لا يستطيع ان يقذف كرة اثقل من ٣ كتل الكترون . وهو يحتاج من اجل قذف الميزون الحصول من اعماقه الخفية على طاقة كبيرة تناظر الـ ٢٧٠ كتلة الكترون الباقية . لكن هذا يناقض بشكل واضح قانون حفظ الطاقة . وبشكل عام فانه في كلتا مرحلتي « لعبة الكرة » يجري الالتزام بهذا القانون ، ولكنه ينتهك بشدة في المرحلة الاولى .

وعندما تبين ان الامر بهذا الشكل أخذ الفيزيائيون يميلون الى فكرة — هي غير طيبة في الحقيقة — تقول بانه يجري الالتزام بقانون حفظ الطاقة بشكل عام في ظواهر عالم الاشياء الدقيقة ، بينما يجري انتهاكه في بعض الحالات . لكن تطور العلم اللاحق قد اظهر مرة اخرى بان هذا القانون صلد كالصخر . لذلك فان سر « لعبة الكرة » بقي دون تفسير من وجهة النظر الكلاسيكية .

لكن سرعان ما يتبدد الضباب حول هذه المسألة عندما نتذكر باننا نبحث الصفات الكمية للجسيمات . وقد اطلق الفيزيائيون على

العمليات التى تحرمها القوانين الكلاسيكية بصراحة اسم العمليات الافتراضية (virtual processes) .

ان مجموعة من الجسيمات (او جسيما واحدا) يمكن ان تتحول الى مجموعة اخرى (او جسيم آخر) بطرق مختلفة . وقد لا نعرف هذه الطرق (وفى الواقع اننا لا نعرفها فى غالب الاحيان) ، لكن لنا الحق فى وصف هذا التحول ، كما يروق لنا ، باستخدام العمليات الوسطية التى يمكن حسابها اليوم . وقد اتضح بان العمليات الافتراضية مريحة « وظاهرة للعيان » بالنسبة للفيزيائيين حاليا .

وهناك سؤال آخر وهو : هل يمكن تبادل الميزون بين البروتون والنيوترون بنفس طريقة تبادل الالكترون فى جزى ء الايدروجين مثلا ؟ ان ذلك اسهل بكثير ، لان الالكترونات لاتعانى اى تحول ، ومع ذلك تقوم رابطة بين الذرات . ولكن هل يستطيع ميزون ــ باى السالب « الدوران » حول بروتونين ؟

كلا ، ان ذلك لا يحدث اطلاقا . واليكم السبب . لقد نجح العلماء مؤخرا فى ربط ميزون ــ ميو بدلا من الالكترون فى قشرة الذرة ، فقام بدور الالكترون على خير وجه . وعلى الاخص وحد مثل الالكترون بين ذرتى الايدروجين فى جزىء واحد ــ هو ميزوجزىء الايدروجين . وبما ان ميزون ــ ميو اضخم من الالكترون بحوالى مائتى مرة فان « سحابة الاحتمال » فيه تكون قريبة من النواة بهذا القدر ايضا . وهذا يعنى بان ميزون ــ ميو يمسك بذرتين فى جزىء اصغر بالحجم بمقدار مائتى مرة .

لكن هذا ليس ميزون باى بل ميزون ــ ميو . كما ان القوى المؤثرة فى الميزوجزى ء هى ليست قوى نووية بل قوى كهربائية . والاخيرة اضعف من القوى النووية بكثير .

ولا يستطيع ميزون ــ باى البقاء فى مكانه من الذرة مثل الالكترون لانه يتبادل الفعل مع النواة بقوة وبشكل متميز جدا . ويكمن ذلك فى ان ميزون ــ باى يحول النيوترون الى بروتون و البروتون الى نيوترون .

انجلاء سر التحول الميزونى

يمكننا فى الواقع ان نعتبر بان ميزون ــ باى يدور بين الجسيمات النووية . ولا تجرى هذه الدورة حول الجسيمات بل فى داخلها ، عن طريق قذف احد الجسيمات له بينما يلتقطه الآخر . لكن عمليات القذف والالتقاط هذه تتعارض مع القوانين التى ذكرناها اعلاه . الا ان هذه العمليات تجرى ... بصورة افتراضية .

وبشكل عام ان العمليات الافتراضية ليست بالشىء الجديد بالنسبة لنا . فلنتذكر مثلا اختراق الجسيم الدقيق للحواجز الجهدية . واذا نظرنا للمسألة من وجهة النظر النظرية الكلاسيكية فان ظهور الجسيم خارج الحاجز ممكن فقط فى حالة ما اذا قفز الجسيم عبر الحاجز . وقد اظهرت علاقة شرودنجر بان الجسيم القابع فى الحفرة ، يستطيع الخروج منها دون ان يصرف اى قدر من الطاقة . لكن هذا يبدو ايضا بشكل يناقض قانون حفظ الطاقة . وفى الواقع فان على الجسيم

ان يستخلص طاقة من ذاته لتحقيق العبور الاختيارى عبر الحاجز .
وبعد ذلك تختفى هذه الطاقة من جديد .

وقد شرحنا اعلاه هذه الظاهرة المتناقضة بالرجوع الى الصفات الموجية للاجسام الدقيقة . ولنسترجع فى اذهاننا مم يتألف شرحنا للمسألة آنذاك .

فبموجب علاقة هيزنبرج ان لكل جسيم عدم تحديد فى قياس كلا من الطاقة الكينماتية وطاقة الوضع . ولدى محاولة الامساك بجسيم اثناء اختراقه الحاجز ، اى العثور عليه داخل الحاجز ، فاننا نعتبر بان طاقته غير محددة. وفى النتيجة تصبح هذه الطاقة بدرجة تتيح للجسيم القفز عبر الحاجز بصورة قانونية تماما ، من وجهة النظر الكلاسيكية .

ومن ناحية الفكر الكلاسيكى فان ما يجرى عندئذ هو انتهاك لقانون حفظ الطاقة . لكن ميكانيكا الكم تبين لنا بانه لا يحدث عند ذاك اى انتهاك لهذا القانون .

ويمكن تقديم نفس التفسير لقذف والتقاط الجسيمات النووية لميزونات ـ باى . اذ انه يمكن تطبيق علاقة هيزنبرج المذكورة (الثانية ، بين الطاقة والزمن، والمذكورة فى ص ١٥٧) ، على الطاقة الحقيقية للجسيم . فمثلا ان ضمور النيوترون لدى قذفه او ابتعاثه لميزون ـ باى سلبى او ضمور البروتون لدى ابتعاثه ميزون ـ باى ايجابى ، وكذلك سمنة الجسيمات التى تلتقط او تبتلع الميزونات ،

يعتبر نوعا من عدم تحديد الطاقة الحقيقية لهذه الجسيمات ، الناجم عن عدم التحديد المعروف فى الكتلة .

ومن الواضح ان عدم التحديد هذا لا يقل من حيث المقدار عن الطاقة الحقيقية لميزون ـ باى $\Delta ف = ك_{\pi} ح^{٢}$ ، حيث $ك_{\pi}$ ـ كتلة السكون لدى ميزون ـ باى . ولنحاول من هنا ان نعرف الزمن الذى يمكن ان يستمر فيه عدم التحديد فى الطاقة هذا . وبتعبير آخر ما هو الزمن الذى تستغرقه دورة كاملة من « لعبة الكرة » بين البروتون والنيوترون فى النواة .

فمن معادلة هيسنبرج ان

$$\Delta ف \times \Delta ن \sim h$$

نحصل على

$$\Delta ن \sim \frac{h}{ك_{\pi} ح^{٢}}$$

وبوضع قيم كتلة ميزون ـ باى $ك_{\pi}$ ، وثابت بلانك h وسرعة الضوء ح ، فى الصيغة المذكورة نحصل على ان $\Delta ن \sim ١٠^{-٢٣}$ ثانية .

وهو زمن ضئيل جدا ! فما هى المسافة التى يمكن ان يقطعها ميزون ـ باى خلال هذه الفترة الزمنية ؟ من الواضح ان هناك حد لمقدارها ، وتتحدد لان ميزون ـ باى يجب ان يتحرك بسرعة اقل

من سرعة الضوء . ولهذا فان المسافة المحددة لبعد ميزون ــ باى عن الجسيم النووى الذى يقذفه تكون م = ح × Δن ~ ١٠^-١٣ سنتيمتر . لكن هذا المقدار يطابق ، من حيث القيمة ، مدى تأثير القوى النووية ! وهو تطابق له اهمية كبيرة ! اذ يؤكد صحة افكارنا .

وهكذا لم يتسن ضبط ميزونات ــ باى اثناء قذفها « غير القانونى » من جسيمات نووية معينة والتقاطها « قانونيا » من قبل الجسيمات الاخرى ، لنفس السبب الذى جعل من غير الممكن ضبط الالكترونات اثناء اختراقها للحاجز الجهدى وحالما قمنا بتشغيل جهاز القياس (الافتراضى طبعا) حتى زاد من طاقة البروتون والنيوترون ، والمشتركين فى عملية تبادل ميزون ــ باى الى درجة ان التبادل اصبح قانونيا تماما من وجهة النظر الكلاسيكية .

ومرة اخرى نجد ان الصفات الموجية للاشياء الدقيقة هى اساس العملية الافتراضية ! وان القوى النووية ذات مدى تأثير محدود ، لان كمات المجال النووى ، اى ميزونات باى ، ذات كتلة سكون لا تساوى الصفر .

ان سلوك ميزون ــ باى « مستقر » تماما ، لكن لدى قيامه بواجباته فى النواة . وعندما يكون فى الحالة الحرة فان الجسيم يسلك سلوكا مغايرا تماما . اذ انه عندما يصبح خارج النواة ينحل خلال فترة قصيرة جدا من الزمن تبلغ جزءا من مائة مليون من الثانية . ويتحول ميزون ــ باى الايجابى الى ميزون ــ ميو ايجابى ، والسلبى

الى ميزون ــ ميو سلبى له نفس اشارة الشحنة . وفى الوقت نفسه يجرى ابتعاث النيوترينو لدى الانحلال .

ونتيجة لذلك تم اكتشاف ميزون ــ باى ثالث متعادل كهربائيا . وهو ينحل بسرعة تزيد بمليارات المرات على سرعة انحلال شقيقيتيه المشحونتين . ولدى موته يولد جسيمين من فوتون جاما لكنهما يتمتعان بطاقة اكبر بكثير ، مما تتولد عند التقاء الالكترون والبوزترون .

ويعتبر عدم الاستقرار هذا بين ميزونات ــ باى والفوتونات هو الفرق الاساسى بينهما . فالفوتونات ، مثلا ، تستطيع تغيير طاقتها ، ويمكنها حتى الاختفاء نهائيا فى الجسيمات ، وتكسبها طاقتها نفسها . لكنها لا تنحل ابدا . ولم يشاهد احد ابدا ان الفوتونات عمدت الى التصادم بـ « الفوتونات » الاصغر منها ، التى تكون طاقتها اقل من طاقة والديها .

وبهذا الشكل عمد ميزون ــ باى الى تعقيد الصورة التى رسمها الفيزيائيون للعلاقة المتبادلة بين المجال والمادة ! والحقيقة انه اكبر هجين غريب ذى وجهين للجسيم والكم .

سرّ الفعل المتبادل

لقد جرت دراسة المجال الكهرومغناطيسى بصورة افضل من جميع المجالات التى عرفها العلم . وقد عرف الكثير عن جانبيه وهما المجال الكهربائى والمجال المغناطيسى . ويتكون المجال

الكهربائى بواسطة الشحنات المستقرة (الاستاتية) والمتحركة ، بينما يتكون المجال المغناطيسى بواسطة الشحنات المتحركة فقط . وبما ان كل فعل متبادل بين الجسيمات يرتبط بحركتها ، ويتجلى فيها ، لذا يمكن القول بشكل عام انه يتواجد مجال كهرومغناطيسى عام دائما لدى حدوث اى فعل متبادل .

ولغرض التبسيط دعنا نترك المجال المغناطيسى جانبا للحظة ، ولنلق نظرة قريبة على المجال الكهربائى ، وبتعبير اكثر دقة ، على المجال الاستاتى الكهربائى . ويتذكر القارئ منذ ايام التلمذة العبارة المقدسة التالية: الشحنات المتشابهة تتنافر والشحنات المختلفة تتجاذب . وتشرح الكتب المدرسية سلوك الشحنات الكهربائية الغامض هذا بالشكل التالى : تكون الشحنة الكهربائية مجالا حولها يعمل على تنافره من كل شحنة مشابهة لها ، تقع فى هذا المجال ، بينما يعمل على جذبها الى كل شحنة مختلفة عنها .

وهذا التفسير يشبه سؤال احدهم : « لماذا مات الرجل ؟ » ، فتلقى الجواب التالى : « لانه فارقته قوى الحياة » .

وتوضع كلمة « قوة » فى الكتب المدرسية محل كلمة « مجال ». لكن لا اهمية لادخال كلمة جديدة ما لم يشرح معناها . غير انه لا يرد اى شرح لهذه المسألة . بل تورد خصائص المجال وهى: التوتر وخطوط القوى... الخ، ولا يجد القارئ اى شىء آخر .

وفى الواقع ان الفيزياء الكلاسيكية التى تشرحها هذه الكتب لا تقدم اى تفسير لمفهوم المجال الذى ادخلته فى العلم . ولقد ظهر ان مفهوم المجال معقد للغاية ، الى درجة ان الفيزيائيين لا يستطيعون الامساك باطرافه فى كثير من المجالات .

اما ميكانيكا الكم فقد حققت بعض النجاح فى هذه المسألة . وهذا ما نود التحدث عنه الآن .

ان الفيزياء تعرف نوعين من الشحنات فقط هما : الموجبة والسالبة . وتخص الشحنة الاولى البروتونات ، بينما تخص الثانية الالكترونات . وهى حاملات الشحنات الوحيدة التى تتصف بالاستقرار المطلق . وسنتحدث فيما يلى عن الالكترونات فقط . فالبروتون كما يبدو اكثر تعقيدا فى « التركيب » ، لذا سنعود اليه فى وقت لاحق .

وهكذا فان جميع الشحنات السالبة تخص الالكترونات . اذن فلنقم باختيار الكترونين ، ولنحاول ان نفهم كيف يعادى احدهما الآخر . وقبل كل شىء ، يبدو ، انهما يجب ان يعرفا « بوجود » احدهما بالآخر .

ان اول فكرة تبرز بهذا الشأن هو ان كل الكترون يعمل على انحناء الفضاء المحيط به ، كما حدد ذلك اينشتين بالنسبة لجميع الاجسام سواء اكانت صغيرة ام كبيرة . ونتيجة لذلك فان كل الكترون يتحرك حول الآخر لا فى خط مستقيم بل فى خط منحن ، مثل كرة تتحرك على ورقة منبعجة بتأثير كرة اخرى موضوعة فوقها .

لكن هذا الانحناء يتحدد بمقدار الكتلة لا الشحنة . فلدينا على هذا الاساس مجال آخر هو مجال الجاذبية .

اما الفكرة الثانية فهى ان الالكترون يعكر انسجام الفراغ من حوله . فاذا ما اعتبرنا بان الفراغ ممتلئ بالا لكترونات التى لم تولد بعد ، فان الالكترون « فوق الفراغى » يجب ان يطرد عنه الالكترونات الفراغية . وعندئذ يظهر لهذا الالكترون رفيق آخ يجب ، طبعا ، ان يؤثر على الفراغ بنفس الصورة .

لكن التنافر بين الالكترونات الحقيقية وا لالكترونات الفراغية يكون متبادلا . وهذا يعنى بان الالكترونات الفراغية التى عملت على ابعاد الالكترون الاول عنها ، ستعمل نفس الشىء بالنسبة للثانى . ويتجلى ذلك فى التنافر المتبادل بين الالكترونين .

لكن اذا ما امعنا التفكير فى هذا الاستنتاج لتبين بانه خاطئ الى حد ما . فاننا نحاول شرح ظاهرة التنافر . لكننا بدلا من ذلك أخذنا فى شرح التنافر بين الالكترونات « الحقيقية » والفراغية . وهكذا غيرنا جياد العربة ولكن دون ان نتحرك قيد انملة من مكاننا !

وهذا هو واقع الحال . ومع ذلك فان صورة الفعل المتبادل للجسيمات عبر الفراغ هى مثمرة ايضا . وكل ما نحتاجه هو ان نفترض بان الالكترون يمكن ان يقذف الفوتونات بذاته .

وفى الحقيقة ، ان الالكترون يستطيع ان يقذف الفوتونات. وقد شاهدنا ذلك لدى قفزاته الى قشرات الذرة . لكنه يغير عندئذ

وضع طاقته . وهو صحيح . وماذا لو ان الكترونا حرا وثابتا قام بابتعاث الفوتون ثم ابتلعه بسرعة مرة ثانية ؟ عندئذ تكون طاقة الالكترون ثابتة . اما عملية الابتعاث نفسها فهى محرمة من وجهة النظر الكلاسيكية . ان ميكانيكا الكم تسمح بهذه العمليات ، كما شاهدنا من قبل ، بشرط واحد هو ان تكون ضمن اطار علاقة الريبة او عدم التحديد .

ان السرعة التى يبتعث فيها الالكترون الفوتون ثم يسترجعه يجب ان تعتمد على مقدار طاقة الفوتون . فكلما ازدادت طاقته كلما انهى الالكترون هذه العملية بسرعة اكبر .

لكنه فى الوقت الذى يكون فيه الفوتون خارج الالكترون ، يجد الفرصة ليتحسس ، مثل رجل الاستطلاع ، مشارف حدود « والده » الذى ارسله . فالى اى حد تستمر ؟ الى ما لاحد له . لان الالكترون يستطيع ابتعاث فوتونات ذات طاقات مختلفة وصغيرة جدا . كما ان الفوتونات يمكن ان تبتعد عن مكونها الى مسافة بعيدة الى ما حد له . على ان مجال تأثير الفوتونات محدد تماما ، ويبلغ بقدر طول موجة الفوتون . وتبلغ هذه المسافة بالنسبة للفوتونات المرئية بقدر جزء من الميكرون .

ومن المفهوم ان الفوتونات لا تكتفى بالقيام بدور المراقبين . فاذا ما لقيت بطريقها فوتونات منبعثة من الكترون آخر يحدث ما يطلق عليه فى البلاغات الحربية باصطدام الدوريات . وقد يحدث نتيجة لهذا الاصطدام ان يتناثر قسم من الفوتونات ولا يعود الى مكونيه . فمثلا قد تبتلعها شريكاتها .

ويتضح الآن بان انتهاك قانون حفظ الطاقة لم يعد شيئا فرضيا بل جليا تماما . لكن الامر ليس كذلك . فان طاقة الالكترونات تتغير بنفس قدر الطاقة الموجودة فى الفوتونات المتناثرة ، وفى النتيجة ، يتباعد كلا الالكترونين فى اتجاهين مختلفين . وفى الواقع كلما ابتعد الالكترونان عن بعضهما البعض كلما نقصت طاقة تبادل الفعل بينهما .

وتصبح الطاقة العامة للفوتونات والالكترونات عندئذ مثلما كانت عليه فى « بداية الامر » . وقد وضعنا هذا التعبير داخل قوسين صغيرين ، لانه لا توجد بداية ولا نهاية لتبادل الفعل بين الكترونين . ولا يمكن بدء او انهاء تبادل الفعل . ومهما ابتعد الالكترونان عن بعضهما البعض فان تبادل الفعل بينهما يظل قائما ابدا .

ومع ذلك فان هذا التفسير يترك شيئا من عدم القناعة فى نفس المرء . اذ يبدو كما لو ان المجال يبقى مرتبطا بمكونه . بينما نحن نعرف جيدا بان الفوتونات مستقلة تماما .

حسنا ، لنقدم عملية افتراضية اخرى لغرض تكوين قناعة اكبر . وقد تحدثنا سابقا عن هذه العملية ، ويمكن ان تحدث فى الواقع ايضا . فلربما يستطيع فوتون نشيط بدرجة كافية ، ومنبعث من الكترون ما ، ان يتحول خلال حياته القصيرة « المسموح بها » الى زوج يتألف من الكترون وبوزترون !

لذا فخلال لحظة واحدة نجد لدينا بدلا من الكترون واحد الكترونين وبوزترون . وتمر هذه اللحظة فيعود هذا الالكترون الى

وحدته السابقة . ولكن اى من الالكترونين يختفى ويندمج بالبوزترون . لا تمكن معرفة ذلك لان الالكترونين متشابهان .

ياله من امر شديد الغرابة ! ومما يؤسف له انه لا تمكن مراقبة هذه « الباقة » من الجسيمات المنبعثة من الكترون واحد ، لان تلك اللحظة قصيرة جدا كما يبدو .

ولنختبر صحة ذلك . اى حساب بسيط ، بموجب معادلة هيزنبرج يبين بان تلك اللحظة تدوم حوالى $١٠^{-٢١}$ ثانية . ويلحق الفوتون خلال هذه الفترة فى توليد زوج من الالكترون الثانى والبوزترون على مسافة $١٠^{-١١}$ سم تقريبا من الالكترون الاول .

وهذه القيمة هى التى تميز « تلطخ » الالكترون فى الفضاء بدرجة ضئيلة جدا . والمقدار $١٠^{-١١}$ ــ هو طول الموجة دى برويل للالكترون التى تتحرك بسرعة تقارب سرعة الضوء .

ان هذه حالة مدهشة حقا ! اذ يتبين منها ان الصفات الموجية للالكترون (وكذلك جميع الجسيمات الاخرى ، طبعا) تستند على تبادل الفعل ، وبتعبير آخر على الطبيعة المجالية للالكترون . ويتلطخ الالكترون لانه يغوص فى الفراغ ، كما يبدو ، ثم يقفز منه الى ما يجاوره بعدد لا يحصى من المرات فى الثانية .

وقد اطلق الفيزنائيون على هذا السلوك الغريب للالكترون تسمية « الالكترون المرتجف » . وهذا الوصف يقارب الواقع الى حد كبير . فان الالكترون يستطيع خلال هذه العملية ان « يرتجف » مهما كان

موقعه فى منطقة الفراغ التى افردت له . ويتحدد هذا الموقع بمقدار الطاقة ، اى بطول موجة الفوتونات التى تستطيع ان تولد زوجا من الكترون وبوزترون .

مملكة الفرضيات

وهكذا فان الالكترون يبعث الفوتونات بصورة افتراضية . وتقوم الفوتونات بالتحول ، افتراضا ، الى ازواج من الالكترونات والبوزترونات . وتندمج الازواج ببعضها البعض مولدة الفوتونات . ويبتلع الالكترون الفوتونات ثانية . ان كل نظّارة الالوان والاشكال الجميلة للتحولات يجب ان تتم بسرعة خيالية تبلغ مليارات مليارات المرات فى الثانية . وقد يبتلع الفوتون لا من قبل الالكترون الذى انبعث منه بل من اى الكترون آخر . لكن الالكترونات متشابهة تماما ، ولا تمكن معرفة اى منها ابتلع الفوتون المنبعث باى حال من الاحوال .

وبذلك فان نتيجة هذا التبادل ليست افتراضية ابدا بل واقعية تماما . فالالكترونات تسعى للابتعاد عن بعضها البعض . ولكن حتى عندما تزيد المسافة بين الالكترونات بمرات كثيرة عن درجة « تلطخها الفراغّى » (vacuum smearedness)، فان الفوتونات تتمسك بها وتبعدها عن بعضها البعض اكثر فاكثر . وكلما تزداد هذه المسافة كلما تنقص امكانية الفوتونات النشيطة فى اجتيازها ، اى ان الطاقة الاقل تنتقل بواسطة الالكترونات عندما تتبادل الفوتونات ، وبذلك

يصبح التنافر بين الالكترونات اضعف . وهذا بالضبط ما ينص عليه قانون كولوم .

ان تبادل الفعل الالكتروني نافذ تماما . ولا يشترك فيه الكترونان كما اعتبرنا ذلك لغرض تبسيط الفكرة ، بل جميع الالكترونات في الكون على الاطلاق . ويمكن العثور على المجال الكهرو مغناطيسي الذي لا حدود له في اي ركن من العالم الفسيح الى ما لانهاية !

كما ان تبادل فعل الالكترون والبوزترون ، والالكترون والبروتون وجميع الجسيمات المشحونة عموما يتسم بنفس الطبيعة الافتراضية . ولكن الآن فقط اصبحت النتيجة الواقعية لتبادل الفوتونات هي لا التنافر المتبادل بين الجسيمات بل تقاربها .

ان الطبيعة ذات وجهين . فهي تعمل على توحيد الاضداد والتفريق بين الظواهر المتحدة . فعندما يلتقي جسيمان لهما شحنتان متضادتان ونفس الكتلة، اي صورتان مرآويتان، « تقفزان من المرآة » ، فانهما يصبحان ذا شحنتين متعادلتين (يتعادلان) ويتحولان الى كمين لنفس المجال الذي أدى الى تبادل الفعل بينهما .

الفرضية تصبح واقعا !

لم يحالف الفيزياثيون التوفيق لدى اختيارهم الكلمة التي ترمز لعمليات تبادل الفعل بين الجسيمات . « فالافتراض » باللاتينية لا يعني في حقيقة الامر سوى « تصور » الشيء . ولكن لا ينبغي

النظر الى هذه العمليات بتشكك باعتبارها مجرد خيال محض ولدته بنات افكار الفيزيائيين . فالفراغ الافتراضى ، مثلا ، قد يصبح فجأة حقيقة واقعة .

ولنتذكر التحولات الالكترونية فى الذرات التى كانت بداية الطيف . ولقد بينا بان هذه التحولات والانتقال من حالة الى اخرى لا يمكن ان يتم الا عندما تتداخل سحب الاحتمالات للالكترونات فى هذه الحالات مع بعضها البعض فى قطاع ما من الفضاء .

وتوجد فى ذرة الايدروجين حالتان من هذا النوع تتداخل سحبهما تماما فيها . وكلتاهما تنتسبان الى القشرة الثانية التى لا تبدأ فى الامتلاء الا فى حالة الليثيوم . وهناك حالة اخرى فى القشرة الاولى ، ونجدها عادة فى اوطأ حالة للطاقة واكثرها استقرارا وهى الالكترون الايدروجينى .

وفى كلتا الحالتين (فى الطابقين الاول والثانى من البناء الذرى) تتطابق السحب الكروية التى لا تتداخل ابدا . اما الحالة الثالثة التى يدور عنها الحديث فهى شقة غير مريحة تقع بين الطابقين الاول والثانى ، وتربط فيما بينهما .

لكنها لا تصبح بين الطابقين الا فى حالة الليثيوم ، اما فى ذرة الايدروجين فانها يجب ان تطابق الشقة الموجودة فى الطابق الثانى . ولا ينبغى وجود مثل هذا التحول الالكترونى الذى امكن ملاحظته فى الليثيوم ، فى حالة الايدروجين . فنحن نعرف بان

الساكنين الذرين لا يقفزون بين الطوابق عادة ، بل يفضلون في البداية دخول الشقق الواقعة ما بين الطوابق .

وفي الواقع انه لم يلاحظ احد مثل هذه التحولات حتى الآن ابدا . فاذا ما سقط احد الساكنين في الطابق الاول لسبب من الاسباب الى الطابق الثاني ، فانه سيعاني من الوحدة هناك ، الى ان تعيده حادثة « غير شرعية » الى مكانه السابق (واحتمال مثل هذا الانتقال ضعيف جدا) .

ولكن وجد الفيزيائيون منذ خمسة عشر عاما بان الالكترون قد افلح في انتهاك هذا التحريم الصارم جدا ، وعاد من الطابق الثاني الى الاول بسهولة كبيرة ! وقد حدث ذلك كما لو انه نزل عبر الشقة الواقعة بين الطابقين بواسطة مصعد كهربائي .

وسرعان ما وجد التفسير لسبب انتهاك هذا التحريم . وقد ظهر بان الفيزيائيين كانوا قد استعدوا مسبقا « بخيالهم » الخصب لمقابلة مثل هذا الحدث . ولنتذكر العملية الافتراضية التي قام فيها الالكترون « الحقيقي » بدفع الالكترونات الفراغية « غير المولودة » عنه . وبدا عندئذ بان الالكترون يصارع ظله ، مثل الشخصية الهزلية في المسرحيات .

وهكذا فان تبادل فعل الالكترون مع الفراغ ، و « ارتجافه » ، يكسبه طاقة اضافية ، واقعية تماما ، ولو انها ضئيلة جدا . ومع ذلك فانه حتى هذه الطاقة ، ـ الضئيلة جدا بالنسبة لطاقة الالكترون في

الذرة ، ـــ بدت غير كافية من اجل ان تنفصل الحالتان المندمجتان في ذرة الايدروجين ، ومن اجل ان يستطيع الالكترون الانتقال من حالة الى اخرى ، ومن الطابق الثانى الى الشقة الحقيقية الواقعة حاليا بين الطابقين ، ومنها الى الطابق الاول !

والحقيقة انه لم يكتشف فى الواقع الا الانتقال من الطابق الثانى الى الشقة ما بين الطابقين . ولكن هذا كان كافيا مع ذلك : فالباقى يجرى بصورة اوتوماتيكية ، كما يقال .

فما هى الاضافة الفراغية الى طاقة الايدروجين ؟ واذا ما تحولت بموجب علاقة بلانك الى تردد ، فانها ستكون لا فى نطاق اشعة جاما او حتى الضوء المرئى ، بل فى نطاق ... موجات اللاسلكى ذات التردد العالى .

ولذلك لم يتم اكتشاف هذه الظاهرة الرائعة بواسطة طرق الطيف الاعتيادية . ولكن جرى بعد الحرب العالمية الثانية صنع المذبذبات (oscillators) ذات التردد العالى ، وتم تشعع ذارت الايدروجين بهذه الموجات اللاسلكية . وعندئذ استجابت فورا للتردد الذى يطابق الاضافة الفراغية . وظهرت « هوة » عميقة فى الطيف للاسلكى (radiospectrum) للايدروجين ـــ اذ ان الكترون الايدروجين كان يبتلع بنشاط كمات هذه الترددات .

وبعد مضى وقت طويل جرى اكتشاف التأثر الفراغى . وقد تحدثنا اعلاه عن المغناطيسين الالكترونيين . فتكون الاول بفعل حركة

الالكترون بالقرب من نواة الذرة ، اما الثانى فقد تكون بتأثير حركة اللف المغزلى للالكترون . وقد التحم الاثنان فى المجال المغناطيسى سوية ، مكونين مغناطيسا واحدا ذا قيمة معينة .

وقام الفيزيائيون بقياس قوة هذا المغناطيس بدقة متناهية . فتبين بان مقدارها يزيد قليلا على مجموع قوتى المغناطيسين المكونين له . وان الفرق فى المقدار هو ضئيل جدا هذه المرة ايضا . ولم يجد الفيزيائيون مفرا من الاعتراف بان هذه الاضافة فى مقدار المغناطيس انما مبعثها تبادل الفعل بين الالكترون والفراغ .

وجاء تفسير ذلك مشابها لما اوردناه سابقا . فان الالكترون لدى حركته فى الذرة يدفع عنه (يتنافر مع) الالكترونات طيلة سيره كما لو كان سفينة ثابتة يندفع الماء من تحتها فحسب ، بينما لو تحركت فانها تعمل على تحريك الماء ايضا . ان انتقال الحركة من الالكترون الى الفراغ يولد فى الاخير تيار الالكترونات الفراغية . وتضاف التأثيرات المغناطيسية للتيار الافتراضى الى التأثيرات التى تطابق الحركة « الحقيقية » للالكترون .

ان ميكانيكا الكم « المشبعة حتى الثمالة » بالاحتمالات لم تتمكن من اعطاء تفسير لهذه الظواهر الرائعة فحسب ، بل وتمكنت من حسابها ايضا . وكانت نتائج الحسابات تطابق نتائج التجارب بشكل مدهش !

وهذا ما يقودنا اليه خيال الفيزيائيين الخصب . ان العمليات الافتراضية شيء يستحق الاحترام حقا ...

فى البحث عن الجسيمات الجديدة

وما ان اتضحت غرابة عالم الاشياء الدقيقة بالنسبة للفيزيائيين وتجلت لهم العلاقات المتبادلة بينها وبين المجال ، حتى بدأ البحث عن جسيمات جديدة . فان كل جسيم جديد ، هو بعد جديد من ابعاد عالم الاشياء الدقيقة ، وهو اكتشاف خصائصه التى تقود العلماء الى الامام فى طريق المعرفة .

وتم لهذا الغرض تجهيز بعثات كاملة لاعمال البحث . وجرى تزويدها باحدث الاجهزة والمعدات . فهى بعثات بكل معنى الكلمة .

وكان المصدر الرئيسى للجسيمات الجديدة لفترة طويلة من الزمن هو الاشعة الكونية ــ اى سيول الجسيمات القادمة من الفضاء الكونى الى الارض . وبدأت اعمال البحث على قدم وساق بشكل خاص بعد ان تزود الفيزيائيون بسلاح جديد قوى جدا لاصطياد الجسيمات الجديدة . وأخذ الفيزيائيون اجهزتهم هذه وصعدوا الى الجبال الشاهقة ، والى مناطق الهواء النقى العالية ، وذهبوا الى البحار ، كما ارسلوا بعض الاجهزة على متن صواريخ الى الفضاء القريب .

وبعد ذلك وفى بداية الخمسينيات وضعت تحت تصرف الفيزيائيين المعجلات القوية للبروتونات حتى طاقات هائلة بلغت اول الامر مئات وملايين الالكترون ــ فولت ، ووصلت فى الاعوام الاخيرة الى عشرات مليارات الالكترون ــ فولت .

وتوالت الغنائم بسرعة اخافت حتى الفيزيائيين انفسهم . وجرى فى كل عام اكتشاف جسيمات جديدة وجديدة . وبلغ عددها حتى اليوم ٣٣ جسيما . هذا فيما عدا الجسيمات « الرنينية » التى سنتحدث عنها بشكل خاص فيما بعد . ان الجسيمات الرنينية تزيد قائمة الجسيمات الى حوالى المائة جسيم .

وكانت ميزونات ــ باى فى مقدمة الغنائم .

وفى بداية الخمسينيات تم العثور على جسيمات ذات كتل اكبر من كتلتى البروتون والنيوترون وهى الهيبرون (hyperon) . واخيرا حملت الاشعة الكونية الى الفيزيائيين هدية ثمينة (سوف نذكر سبب ذلك فيما بعد) وهى مجموعة ميزونات ــ ك .

وعندما بدأ استعمال مكنات ضخمة لتعجيل البروتونات حتى تبلغ سرعات الضوء، أدى ذلك الى اكتشاف جسيمين آخرين بسرعة . وقد أكد اكتشافهما صحة نبوءة نظرية ديراك وهما ضديد البروتون وضديد النيوترون .

ولنتفحص الآن بصورة افضل قائمة الغنائم . ونرى فيها قبل كل شيء الحدود الواسعة التى تضم كتل الجسيمات : من كتلة النيوترينو الصفرية الى هيبرون ــ دلتا « الرنينى » الذى تبلغ كتلته اكثر من اربعة آلاف كتلة الالكترون. وتتوزع الجسيمات عندئذ على الكتل بصورة غير متناسقة كليا . فتتجمع فى مجموعات من جسيمين او ثلاثة او حتى اربعة ذات كتل متقاربة نسبيا .

ويكون اختلاف الشحنات ومقادير اللف اقل بكثير . واذا ما تفحصنا الجسيمات « الحقيقية » فقط (اى لا « الرنينية ») فان شحنتها الكهربائية تكون ذات قيم ثلاث فقط (+١ ، صفر ، −١ ، حيث تعتبر شحنة الالكترون −١) ، وتكون قيم اللف ثلاث ايضا (صفر ، $\frac{١}{٢}$ ، ١) .

وغالبية الجسيمات فى هذه القائمة غير مستقرة : فهى تعيش فى المتوسط من عدة آلاف ثانية (النيوترونات) الى تريليون تريليون جزء من الثانية (وهى الميزونات والهيبرونات الرنينية) . ولكن هذين الزمنين يؤلفان اقصى الحالتين . فان الميزونات والهيبرونات تعيش فى المتوسط من جزء من ماثة مليون من الثانية الى جزء من عشر مليارات منها .

ولا يجب الخلط عندئذ بين مدة حياة الجسيم مع زمن بقاءه فى عالمنا . ولنأخذ البوزترون مثلا . فانه فى الواقع مستقر من حيث انه لا ينحل الى جسيمات اخرى . لكنه لا يتواجد فى عالمنا لفترة طويلة . فما ان يلتقى بالكترون حتى يختفى بسرعة . ومن جانب آخر فان ميزونات − باى غير المستقرة فى صورتها النقية لا تنحل فى النوى ابدا .

ولنلق نظرة على العمود الاخير من الجدول . فما هى الجسيمات التى تظهر فى غالب الاحيان فى المنتجات المنحلة للجسيمات

المجموعة	اسم الجسيم	الرمز: الجسيم	الرمز: ضديد الجسيم	الكتلة	اللف	الشحنة الكهربائية: الجسيم	الشحنة الكهربائية: ضديد الجسيم	شحنة باريون: جسيمات	شحنة باريون: أضداد الجسيمات
	الفوتون	γ	γ	صفر	١	صفر	صفر	صفر	صفر
ليبتونات	نيوترينو ١	ν_e	$\bar{\nu}_e$	صفر	٢/١	صفر	صفر	صفر	صفر
	نيوترينو ٢	ν_μ	$\bar{\nu}_\mu$	صفر	٢/١	صفر	صفر	صفر	صفر
	الكترون	e^-	e^+	١	٢/١	١−	١+	صفر	صفر
	ميون	μ^-	μ^+	٢٠٦,٧	٢/١	١−	١+	صفر	صفر
ميزونات	ميزون — باى	π°	π°	٢٦٤,٢	صفر	صفر	صفر	صفر	صفر
		π^+	π^-	٢٧٣,٢	صفر	١+	١−	صفر	صفر
	ميزون — ك	K^+	K^-	٩٦٦,٥	صفر	١+	١−	صفر	صفر
		K°	$\bar{K}^\circ$	٩٧٤	صفر	صفر	صفر	صفر	صفر
	ميزون — ايتا	η°	η°	١٠٨٠	صفر	صفر	صفر	صفر	صفر
	ميزونات « رنينية »			١٤٧٠	١	١ ؛ صفر	−١ ؛ صفر	صفر	صفر
				١٥٣٠	١	صفر	صفر	صفر	صفر
				١٧٣٠	١	١ ؛ صفر	−١ ؛ صفر	صفر	صفر
				٢٠٠٠	١	صفر	صفر	صفر	صفر
				٢٣٩٠	؟	١ ؛ صفر	−١ ؛ صفر	صفر	صفر
				٢٤٥٠	٢	صفر	صفر	صفر	صفر

شحنة ليبتون جسيمات	شحنة ليبتون اضداد الجسيمات	لف نظائرى	الغرابة جسيمات	الغرابة اضداد الجسيمات	زمن البقاء بالثوانى	نواتج انحلال الجسيم
صفر	صفر	صفر	صفر	صفر	مستقر	
١ ١ ١ ١	−١ −١ −١ −١				مستقر مستقر مستقر ٢,٢ × ١٠^−٦	$e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e$
صفر صفر	صفر صفر	١	صفر صفر	صفر صفر	٢,٢ × ١٠^−١٦ ٢,٦ × ١٠^−٨	$2\gamma;\ \gamma + e^+ + e^-$ $\mu^+ + \gamma_\mu$
صفر	صفر	٢/١	١	−١	١,٢ × ١٠^−٨	$e^+ + \nu_e + \pi^\circ;$ $\mu^+ + \nu_\mu;\ \pi^+ + \pi^\circ$ $3\pi;\ \mu^+ + \nu_\mu + \pi^\circ$
صفر	صفر	٢/١	١	K_1° −١ K_2°	١,٠ × ١٠^−١٠ ٦ × ١٠^−٨	$\pi^+ + \pi^-;\ 2\pi^\circ$ $\pi^\circ + \pi^+ + \pi^-;$ $\pi^+ + e^- + \bar{\nu}_e$
صفر	صفر	صفر	صفر	صفر	١٠^−٢٣	$\pi^+ + \pi^- + \pi^\circ$
صفر صفر صفر صفر صفر صفر	صفر صفر صفر صفر صفر صفر	١ صفر ٢/١ صفر ١ صفر	صفر صفر ١ صفر صفر صفر	صفر صفر −١ صفر صفر صفر	~ ١٠^−٢٣	

المجموعة	اسم الجسيم	الرمز		الكتلة	اللف	الشحنة الكهربائية		شحنة باريون	
		الجسيم	ضديد الجسيم			الجسيم	ضديد الجسيم	جسيمات	أضداد الجسيمات
باريونات	بروتون	p	$\bar{p}$	١٨٦٣,١	٢/١	١+	-١	١	-١
	نيوترون	n	n	١٨٣٨,٥	٢/١	صفر	صفر	١	-١
	هيبرون لامدا	Λ°	$\bar{\Lambda}^{\circ}$	٢١٨٢	٢/١	صفر	صفر	١	-١
	هيبرونات سيجما	Σ^{+}	$\bar{\Sigma}^{+}$	٢٣٢٧	٢/١	١	-١	١	-١
		Σ°	$\bar{\Sigma}^{\circ}$	٢٣٣١	٢/١	صفر	صفر	١	-١
		Σ^{-}	$\bar{\Sigma}^{-}$	٢٣٤٠	٢/١	-١	١	١	-١
	هيبرون — اكسى	Ξ°	$\bar{\Xi}^{\circ}$	٢٥٦٥	٢/١	صفر	صفر	١	-١
		Ξ^{-}	$\bar{\Xi}^{-}$	٢٥٨٠	٢/١	-١	١	١	-١
	هيبرون — اوميجا	Ω^{-}	$\bar{\Omega}^{-}$	٣٢٩٦	٢/٣	-١	-١	١	-١
	هيبرونات « رنينية »	N_1	$\bar{N}_1$	٢٩٨٠	٢/٣	صفر	صفر	١	-١
		N_2	$\bar{N}_2$	٣٣٠٠	٢/٥	صفر	صفر	١	-١
		N_3	$\bar{N}_3$	٤٢٩٠	؟	صفر	صفر	١	-١
		Δ_1	$\bar{\Delta}_1$	٢٤٢٠	٢/٣	٢ ، ١ ، صفر ، -١	-٢ ، -١ ، صفر ، ١	١	-١

شحنة ليبتون جسيمات	شحنة ليبتون اضداد الجسيمات	لف نظائرى	الغرابة جسيمات	الغرابة اضداد الجسيمات	زمن البقاء بالثوانى	نواتج انحلال الجسيم
صفر	صفر	٢/١	صفر	صفر	مستقر	
صفر	صفر		صفر	صفر	١٠١٣	$p + e^- + \bar{\nu}_e$
صفر	صفر	صفر	١−	١	٢,٥ × ١٠^−١٠	$p + \pi^-;\ n + \pi^\circ$
صفر	صفر	١	١−	١	٠,٨ × ١٠^−١٠	$p + \pi^\circ;\ n + \pi^+$
صفر	صفر	١	١−	١	اقل من ١٠^−١١	$\Lambda^\circ + \gamma$
صفر	صفر	١	١−	١	١,٦ × ١٠^−١٠	$n + \pi^-$
صفر	صفر	٢/١	٢−	٢	١,٥ × ١٠^−١٠	$\Lambda^\circ + \pi^\circ$
صفر	صفر	٢/١	٢−	٢	١,٢ × ١٠^−١٠	$\Lambda^\circ + \pi^-$
١	١	صفر	صفر	صفر	~ ١٠^−١٠	$\Xi^\circ + \pi^-$
صفر	صفر	٢/١	صفر	صفر		$p + \pi^-;\ n + \pi^\circ$
صفر	صفر	٢/١	صفر	صفر		$\pi^\circ + n;\ K^\circ + \Lambda^\circ$
صفر	صفر	٢/١	صفر	صفر	~ ١٠^−٢٣	$p + \pi^-;\ n + \pi^\circ$
صفر	صفر	٢/٣	صفر	صفر		$p + \pi^-;\ n + \pi^\circ$

المجموعة	اسم الجسيم	الرمز		الكتلة	اللف	الشحنة الكهربائية		شحنة باريون	
		الجسيم	ضديد الجسيم			الجسيم	ضديد الجسيم	جسيمات	الجسيمات اضداد
باريونات	هيبرونات «رنينية»	Δ_2	$\bar{\Delta}_2$	٣٢٣٠	٢/٥	٢ ، ١ ، صفر ، −١	−٢ ، −١ ، صفر ، ١	١	−١
		Λ_3	$\bar{\Delta}_3$	٣٧٦٠	٢/٧	٢ ، ١ ، صفر ، −١	−٢ ، −١ ، صفر ، ١	١	−١
		Λ_4	$\bar{\Delta}_4$	٤٦٢٠	؟	٢ ، ١ ، صفر ، −١	−٢ ، −١ ، صفر ، ١	١	−١
		Λ_1	$\bar{\Lambda}_1$	٢٧٥٠	؟	صفر	صفر	١	−١
		Λ_2	$\bar{\Lambda}_2$	٢٩٩٠	٢/٣	صفر	صفر	١	−١
		Λ_3	$\bar{\Lambda}_3$	٣٥٦٠	٢/٥	صفر	صفر	١	−١
		Ξ_1	$\bar{\Xi}_1$	٣٠٠٠	٢/٣	صفر ، −١	صفر ، +١	١	−١
		Σ_1	$\bar{\Sigma}_1$	٢٧٢٠	٢/٣	١ ، صفر ، −١	−١ ، صفر ، ١	١	−١
		Σ_2	$\bar{\Sigma}_2$	٣٢٥٠	٢/٣	١ ، صفر ، −١	−١ ، صفر ، ١	١	−١

ان الكتل فى الجدول معطاة بوحدات كتلة الالكترون ، الشحنات الكهربائية بوحدات الجسيمات المذكورة في الجدول .

شحنة ليبتون		لف نظائرى	الغرابة		زمن البقاء بالثوانى	نواتج انحلال الجسيم
جسيمات	اضداد الجسيمات		جسيمات	اضداد الجسيمات		
صفر	صفر	٢,٣	صفر	صفر		$p+\pi^-;\ n+\pi^\circ$
صفر	صفر	٢,٣	صفر	صفر		$K+\Sigma;\ p+\pi^-$
صفر	صفر	٢,٣	صفر	صفر		$p+\pi^-;\ n+\pi^\circ$
صفر	صفر	صفر	١-	١		$\Sigma+\pi$
صفر	صفر	صفر	١-	١	~ ١٠-٢٣	$\Sigma+\pi$
صفر	صفر	صفر	١-	١		K^-+p
صفر	صفر	٢/١	٢-	٢		$\Xi+\pi$
صفر	صفر	١	١-	١-		$\Lambda^\circ+\pi$
صفر	صفر	١	١-	١-		$\Lambda^\circ+2\pi;\ \Sigma+2\pi$

شحنة الالكترون . ونواتج انحلال اضداد الجسيمات هي اضداد جسيمات بالنسبة

الاخرى المستقرة ؟ انها بالنسبة للميزونات والنيوترون تتمثل بالالكترونات والنيوترينو . وتلاحظ النيكلونات وميزونات ـ باى دائما وسط منتجات انحلال الهيبرونات .

تصنيف الغنائم

هذه هى الاستنتاجات الاولية التى يمكن التوصل اليها لدى « تسجيل نفوس » سكان عالم الاشياء الدقيقة . وينبغى علينا الآن ان نتوصل باستخدام النظريات الى الاستنتاجات اللازمة الخاصة بظروف حياة الجسيمات فى عالم الاشياء الدقيقة .

فما هو سبب الاختلاف العظيم فى كتل الجسيمات ؟ وما هو الحد الاقصى للكتلة ؟ وهل هو هيبرون ٤ الثقيل ؟ ولماذا تتجمع الجسيمات المتقاربة فى الكتل فى مجموعات من جسيمين او ثلاثة او اربعة ؟ ولماذا ينبغى ان تكون لشحنة ولف الجسيمات ثلاث قيم فقط باستثناء « الجسيمات الرنينية » ؟ لماذا تكون غالبية الجسيمات غير مستقرة ، بينما توجد ايضا جسيمات مستقرة ؟ لماذا تختار الجسيمات نوعا او اثنين من انواع الانحلال فقط؟

ويجب القول قبل كل شىء بان ميكانيكا الكم لم تعط الاجوبة على غالبية هذه الاسئلة . اما الاجابة عن الاسئلة الباقية فهى اقرب منها الى الشرح من تعليل الاسباب . وهذا شىء لا بأس به ايضا .

ويبدو تجمع الجسيمات حسب الكتل فى القائمة المذكورة

بشكل واضح جدا . كما ان كتل الجسيمات فى المجموعة متقاربة جدا من بعضها البعض بالمقارنة مع الفاصل الكبير الذى يفصل بين مجموعة واخرى . وقد اقترحت فكرة هامة جدا لشرح ذلك وهى : ان مجموعة الجسيمات ما هى فى الواقع سوى جسيم واحد ، لكنه يتخذ مظاهر متعددة .

ولنأخذ على سبيل المثال ميزون ـ باى . فان كتلتى ميزون ـ باى سالب وميزون ـ باى موجب متكافئتان ، وتختلفان عن كتلة ميزون ـ باى المحايد . وهل ان سبب ارتفاع كتلة الجسيمات المشحونة يعود لكونها ذات شحنة ؟

فقد قلنا اعلاه بان جزءا من كتلة الجسيم يرتبط بالمجال . وبما ان ميزونات باى هى كمات مجال نووى ، وهى اقوى بكثير من المجال الكهرومغناطيسى . لذا فمن المناسب القول بان الكتلة الاساسية لميزونات باى تعود الى المجال النووى بالذات ، مضافا اليه المجال الكهرومغناطيسى المرتبط بوجود شحنات لدى الجسيمات ، ويلعب دورا صغيرا فى كتلتها . لذا فان ميزونات باى المشحونة هى اكبر كتلة من ميزونات باى المتعادلة ، التى تكون كتلتها وهو شىء مفهوم ذات اصل نووى تام .

كما انه من المفهوم ايضا لماذا لا تكون الجسيمات الخفيفة فى هذه الحالات المجموعات الثلاثية . ويتميز المجال النووى بان كماته ليست ذات كتلة سكون محايدة ، بينما لا تكون لكمات

المجال الكهرومغناطيسى ـ الفوتونات ـ مثل هذه الكتلة . واصل الالكترون والبوزترون وكلا ميزونى ـ ميو غير نووى وكهرومغناطيسى . وهذا يفسر عدم وجود جسيم متعادل الشحنة بينها . وبذلك يتبقى احتمالان وهما وجود جسيم سالب وآخر موجب الشحنة ، اى الثنائى.

لكن مثل هذا التفسير لا يسرى على ميزونات ـ ك . وتكون ميزونات ـ ك المتعادلة اضخم من المشحونة . ويبدو المجال الكهرومغناطيسى هنا كما لو انه « أسقط » من المجال النووى .

ولغرض حساب قوانين تجمع الجسيمات فى مجموعات استحدث الفيزيائيون مفهوم اللف النظائرى (isotopic spin) . ولا يربطه باللف العادى سوى تشابه بعيد جدا . ولنرجع بذاكرتنا الى احد الاسئلة المحيرة التى طرحها العاملون فى دراسة علم الطيف للفيزيائيين النظريين وهو : لماذا تنقسم خطوط الطيف الى ثلاثة خطوط (او اكثر) « تابعة » ؟

ووجب لاعطاء تفسير لهذه الظاهرة ، كما قلنا ، الى « استحداث » اللف . ان سبب نشوء الخطوط « التوابع » لخط الطيف الرئيسى يعود بالذات الى الاختلاف البسيط فى الطاقات الالكترونية فى الذرات لدى اختلاف اتجاه اللف .

وبالمثل اعتبر النظريون مجموعات الجسيمات المتقاربة فى كتلها ، وكأنها كتلة واحدة ، مجزئة الى جسيمات تابعة بسبب وجود المجال الكهرومغناطيسى .

وظهر بان قواعد اللف النظائرى هى بشكل عام نفس قواعد اللف الاعتيادى . فاذا ما كان اللف يساوى الصفر فان الخط لا يتجزأ ، يبقى الجسيم وحيدا لوحده ، ولا توجد اية جسيمات بالقرب منه . اما اذا كان الجسيم يساوى النصف فان الخط ينقسم الى اثنين اى « توائم » . وتكون هذا الثنائى بالذات الجسيمات مثل ميزونات ـ ك . واذا كان اللف يساوى واحدا فتتكون خطوط او جسيمات « ثلاثية » ، ويعتمد ذلك على كون اللف اعتياديا ام نظائريا .

الكلمة لاضداد الاجسام

كانت مجموعة النيكلون تتألف حتى عام ١٩٥٥ من البروتون والنيوترون . وكان هذا الزوج يثير العجب حقا فيتألف من ثنائى جسيم مشحون وآخر متعادل ! وبدا ان اللغز قد حلّ ، عندما تم اكتشاف ضديد البروتون ذى الشحنة السالبة . فامامنا الآن ثلاثية اعتيادية تشبه مجموعة ميزونات ـ باى !

والحقيقة انه ما زال هناك شىء يثير العجب : اذ يظهر بان النيوترون المتعادل هو اثقل وليس اخف من البروتون واضداد جسيماته . وهنا يجرى « اسقاط » المجال الكهرومغناطيسى من المجال النووى تماما . على ان اهم شىء فى الامر هو انه ظهر بان البروتون والنيوترون هما جسيم واحد لكن بشكلين متغايرين . وبالمناسبة ، ان الفيزيائيين

قد تكهنوا سابقا بهذه الوحدة ، عندما اتضح بان كلا الجسمين يتحولان الى بعضهما البعض بنفس القدر .

ولكنه عثر على ضديد النيوترون بعد مضى عام على اكتشاف ضديد البروتون . فظهر فى المجموعة جسيم رابع . لكن ضديد النيوترون لم يود دخول نظام المجموعة . وهكذا انهار النظام . ولم يبق سوى مخرجا واحدا وهو اعتبار مجموعة النيكلونات مؤلفة من زوجين هما : البروتون والنيوترون مع ضديديهما .

وتشبه مجموعة الجسيمات هذه من حيث المظهر رباعية ميزون — ك . وسنتحدث عنها فيما بعد بشكل خاص .

فهل يوجد قانون ما يعتبر اساسا لهذا التركيب المتعدد الاوجه لمجموعات الجسيمات ؟ لابد من وجود هذا القانون ، لكننا لا نعرفه بعد . وقد جرى احصاء نفوس سكان عالم الاشياء الدقيقة ، وحتى استطعنا ان نعرف فى بعض الحالات توزيع ساكنيه حسب انواع عملهم . ومع ذلك لم نتوصل الى استنتاجات نهائية بهذا الشأن ، فلم يحن الوقت لهذا بعد .

اما الآن فلنحاول ان نعرف بم يختلف الجسيم عن ضديده . ان نظرية ديراك تنص فى شكلها الاولى ، كما نعرف ، على ان الاختلاف يكمن فى علامة الشحنة الكهربائية . وهذا يصح بالنسبة للالكترون والبوزترون ، والبروتون وضديد البروتون ، ولزوج ميزونات — ميو ولجميع الجسيمات المشحونة عموما .

ولكن بم يختلف ، مثلا ، النيوترون عن ضديده ؟ فكلاهما غير مشحونين ، وكتلتاهما متكافئتان كما هو الحال في اى زوج من الجسيمات واضداد الجسيمات . وقد ظهر بان الاختلاف هو في اتجاهات اللف .

فكيف يمكن اعتبار اللف « ضديد الصفة » ؟ فنحن نعرف ، مثلا ، بان الالكترونات تتخذ حالات الطاقة في الذرة بشكل ازواج ، اى تكون اتجاهات اللف فيها متعاكسة . لكنهما يظلان مع ذلك عندئذ كالكترونين ، ولا يتحول اى منهما الى بوزترون .

كما ان نيوترونات النواة ، كما عرفنا ، يمكن ان تشغل مستويات الطاقة ، في النموذج القشرى للنواة بشكل ازواج ، دون ان تتولد عندئذ اضداد النيوترونات .

وقد ظهر بان المسألة هي غير ذلك . فان كون لفوف الكترونات الذرة موجهة بصورة زوجية في اتجاهات متضادة لا يدل الا على ان الالكترونات نفسها تتحرك في اتجاهات متضادة . واذا ما صورنا الالكترونات باعتبارها « سحب احتمال » ، فمن الصعب ان نتصور ، طبعا ، حركتين متضادتين . وبالنسبة للذرة الحرة فانهما لا يختلفان في الطاقة . ولكن مما لا شك فيه ان لف الالكترون يتجه دائما بشكل معين بالنسبة لاتجاه الحركة . فمثلا اذا تحرك الالكترون نحو اليمين فيمكننا ان نعتبر بشكل افتراضي بان لفه يتجه بزاوية ما الى الاعلى ، واذا ما تحرك نحو اليسار فان لفه يتجه بزاوية ما الى الاسفل .

ويمكننا ان نبين بانه اذا ما قاربت سرعة الالكترون سرعة الضوء ، فان اتجاه لفه يقترب شيئا فشيئا من اتجاه حركته . اما اللف بالنسبة للبوزترون عند الحركة الى اليمين فانه يجب ان يشير الى الاسفل ، والعكس بالعكس . اما بالنسبة للبوزترون السريع جدا فان اللف يتجه تماما ضد اتجاه الحركة تقريبا . ويجب بهذا الشكل بالذات ان نتفهم الاختلاف بين اتجاهى حركتى لف النيوترون وضديد النيوترون .

ولربما يقول القارئ بعد ان تصيبه خيبة الامل : « ولكن ما هو الخلاف هذا ! » . ان هذا الخلاف يبدو كافيا لجعل الجسيم وضديده يختفيان معا ، ويتحولان الى كمات المجال .

انحلال الجسيمات

كيف تولد وتموت الجسيمات ؟ وكانت الالواح الفوتوغرافية اول من سجل هذه الاحداث التى تجلب دوما السرور الى قلوب العلماء .

وها قد ظهر على اللوح الفوتوغرافى اثر سميك الميزون ـ ناقص ـ ميو . وقبل ان يبلغ الاثر وسط اللوح حتى « يتكسّر » ويتحول الى ما يشبه النقاط تقريبا . ويعود هذا الجزء من الاثر الى الالكترون . ويظهر موضع الاثر المنقط مولد جسيمين يحملان معهما باقى الطاقة وكمية تحرك ميزون ـ ميو ، الذى لم ينتقل الى الالكترون . وهذان الجسيمات هما النيوترينو وضديده .

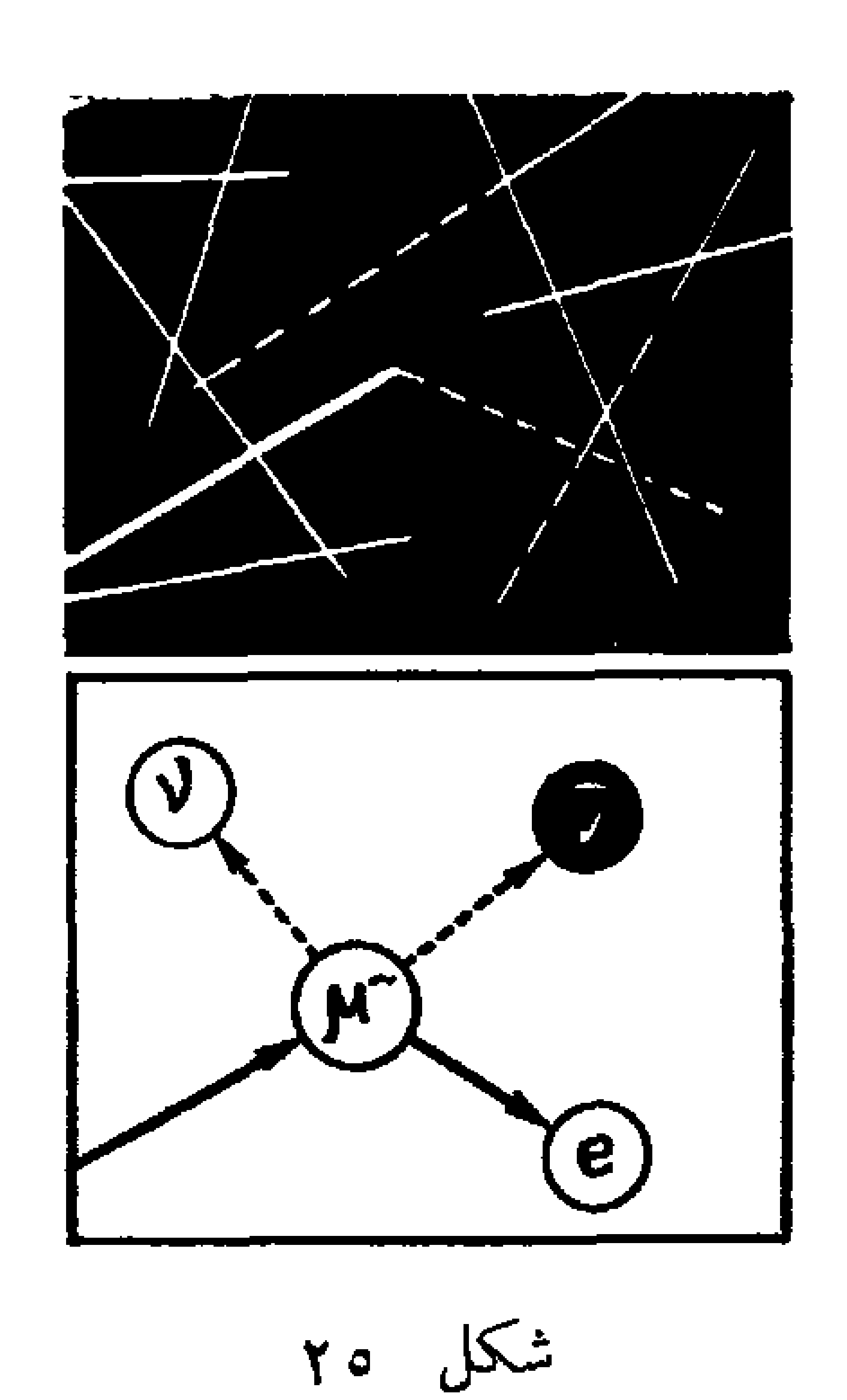
وكقاعدة فان ميزونات ــ باى لا تنحل الى الكترونات مباشرة . فهى تولد ميزونات ــ ميو أول الامر . وعندئذ نشهد بان المجالين النووى والكهرومغناطيسى لا ينفصلان عن بعضهما البعض بجدار لا يخترق كليا . فيتحول جسيم ذو اصل نووى الى جسيم ذى طبيعة كهرومغناطيسية .

لماذا تتحول ميزونات ــ باى الى جسيمين ، بينما تتحول ميزونات ــ ميو الى ثلاثة جسيمات ؟ وليس من الصعب الاجابة على هذا السؤال . فالمسألة تنحصر فى لفوف الجسيمات : ان مجموع لفوف الجسيمات المتكونة يجب ان يساوى لف الجسيم المكون لها .

ويكون لف الميزون ــ ميو « نصفيا » ، وكذلك فان لف الالكترون يكون « نصفيا » . ولكن بما ان الالكترون لا يمكن ان يحمل معه كل كتلة ميزون ــ ميو ، ولا بد من وجود نيوترينو يتولى نقل باقى هذه الكتلة بشكل طاقته الحركية . لكن لف النيوترينو هو « نصفى » ايضا ، فعندئذ يكون اللف العام للجسيمات المولودة ــ كما يبدو ــ هو اكبر من لف الجسيم المولد لها .

فينبغى عندئذ « الغاء » اللف الزائد للنيوترينو . وهكذا يظهر الى الوجود ضديد النيوترينو ذو اتجاه لف معاكس . وتكون النتيجة تولد ثلاثة جسيمات .

ولدى انحلال ميزون ــ باى يكفى نيوترينو واحدا (او ضديده) ذا لف يتجه بعكس لف ميزون ــ ميو المولد له . ويلغى هذان اللفان الواحد الآخر ، وتكون النتيجة صفرا ، وهذا المقدار يساوى لف ميزون ــ باى الاصلى .



شكل ٢٥

اما فى حالة الهيبرونات فان ناتج الاستقرار النهائى لانحلالها هو البروتون فى غالب الاحيان. وبالاضافة الى ذلك فان الهيبرونات تبعث ميزونات ــ باى ايضا . فلدينا عالمان ــ وتابعان لا مفر منهما اثناء عملية الانحلال وهما : النيوترينو لدى الجسيمات الخفيفة ، وميزونات ــ باى لدى الجسيمات الثقيلة .

ولنواصل البحث . فهل يوجد قانون ما يقوم باختيار شكل او شكلين (فى اقصى الاحتمالات) من جميع اشكال الانحلال الممكنة للجسيم ؟

وقد لاحظنا من قبل بعض الخصائص المعينة لهذا الاختيار . ولنطلق عليها تشبيها بقوانين الفيزياء الكلاسيكية اسم قوانين الحفظ . وتبين الملاحظات بانه لدى حدوث الانحلال يبقى مجموع الشحنة ،

ومجموع لف الجسيم . لكن تلك القوانين تترك بعض الحرية فى اختيار شكل الانحلال .

وكان لابد من البحث عن قوانين اضافية ما فى الانحلال يمكن ان تضيق بصورة اكبر ، الطريق الذى يمكن ان تسير فيه الجسيمات غير المستقرة ، لتتحول الى احجار البناء المستقرة للمادة اى البروتونات والالكترونات .

الفيزيائيون يصنفون تبادل الفعل

لنورد مثالا على سبيل التشبيه . فهناك طرق كثيرة فى تحطيم الجبل . منها طريقة قوية وسريعة هى التفجير ، مثل انفجار البراكين . ومنها طريقة اضعف وابطأ من الاولى ، لكنها تستطيع تحطيم الجبل خلال فترة قصيرة نسبيا وهى قيام الزلزال . واخيرا هناك ابطأ طريقة وهى تحطيم الجبل بفعل المياه والرياح ، والحرارة والبرودة . فالانفجار يستطيع تحطيم الجبل خلال ثوان معدودات ، والزلزال خلال عدة ساعات ، والمياه والرياح خلال آلا ف السنين .

وقد لاحظ الفيزيائيون اثناء دراستهم الجسيمات الدقيقة وجود ثلاث طرق ايضا لتحطيمها ، تجرى بقوة وسرعة مختلفتين .

واولها ، وهى اقواها ، تجرى لدى اصطدام الجسيمات النووية وعند تبادل الفعل بينها فى النوى . وقد اطلق الفيزيائيون تسمية تبادل الفعل القوى على هذه العملية التى تتميز بطاقات كبيرة تعادل الطاقة

الحقيقية لميزون ــ باى واعلى منه ، وفترات زمنية قصيرة جدا بموجب علاقة الريبة. وقد حسبنا من قبل الزمن الذى يميزه وهو يعادل $١٠^{-٢٣}$ ثانية .

اما العملية التالية لذلك من حيث القوة والامتداد فهى التأثير الكهرومغناطيسى . فنتيجة لهذه العملية بالذات يولد الالكترون والبوزترون لدى التقائهما فوتونين ــ جاما اثنين . وينتسب لذلك ايضا انحلال ميزون ــ باى الصفرى المتعادل الى فوتونات ــ جاما الذى درسناه اعلاه . وتعادل فترة سريان هذه العملية $١٠^{-١٧}$ ثانية .

واخيرا هناك اضعف واطول عملية التى سماها الفيزيائيون بتبادل الفعل الضعيف . وهى المسؤولة عن غالبية اشكال الانحلال الواردة فى جدول الجسيمات الدقيقة . فتنحل نتيجة لتبادل الفعل الضعيف ميزونات ــ ميو وباى وك ، والنيوترون والهيبرونات . ويعادل زمن تبادل الفعل التحطيمى « العام » ، الذى يؤثر على الجسيمات فى كافة المجموعات ، كما هو واضح من الجدول ، $١٠^{-١٠}$ ثانية .

وقد لاحظ العلماء لدى دراستهم مجموعة الجسيمات خاصية واحدة هامة . اذ اتحدت ميزونات ــ ك والهيبرونات فى مجموعتين مختلفتين عما تقوم به الجسيمات الاخرى .

ولم ترغب هاتان المجموعتان دخول جدول تصنيف الجسيمات الذى وضعه العلماء . وقد اعرب هؤلاء عن استغرابهم لذلك ووصفوا هذه الجسيمات العنيدة « بالغريبة » تعبيرا عن حيرتهم . حتى انهم

استحدثوا مقدارا معينا يمكنه ان يميز عمليا درجة انحراف صفات هذه الجسيمات عما يجب ان تكون عليه . وسمى هذا المقدار بالغرابة .

وقد تبين بان الجسيمات الغريبة لا تستطيع الانحلال الى جسيمات اعتيادية باية عملية اخرى غير عملية تبادل الفعل البطيء . وعند حدوث الاصطدامات بين الجسيمات الاعتيادية فان الجسيمات الغريبة يمكن ان تولد بصورة زوجية فقط . ولكن ليس باية ازواج ، بل بشكل الازواج التى تكون قيمة الغرابة فيها تساوى الصفر فقط ، مثل الجسيمات الاعتيادية الاصلية .

وبتعبير آخر ان الغرابة لم تتبدل عند حدوث تبادلات الافعال القوية والكهرومغناطيسية . ويدعى ذلك بقانون حفظ الغرابة . ولا يصح هذا القانون فى حالة تبادلات الافعال الضعيفة .

وقد يقول القارئ : « ما اكثر هذه القوانين ! » — فاين القانون العام الموحد ؟ اين تفسير جميع هذه القوانين ؟ لقد حان الحين للحديث عن ذلك .

وللاسف ان الحتميات المذكورة ليس لها اية تفسيرات مقنعة بعد . ويوحد الفيزيائيون هذه القواعد بهذا الشكل او ذاك ، ومع ذلك فلم يظهر حتى الآن ذلك الجوهر العميق الذى يختفى وراءها . صحيح ان « المنطق الرياضى » قد ساعد على القيام بهذه المهمة التى بدأنا بها الحديث . ان جميع القواعد المذكورة مأخوذة سوية لا تبقى للجسيمات الا بعض الطرق المحدودة فى الانحلال .

وقد اتاحت دراسة انحلال ميزونات ـ ك القيام باضخم اكتشاف في فيزياء الجسيمات الدقيقة بعد العثور على التأثيرات الفراغية . وتتمثل في العبارة التالية التي اثارت الاوساط العلمية في العالم اجمع : « لاحفظ التماثل » .

لغز ميزونات ـ ك

اكتشفت ميزونات ـ ك لاول مرة في الاشعة الكونية قبل ما لا يزيد عن عشر سنوات مضت . واستطاعت عيون الفيزيائيين اليقظة ان تلاحظ ، وسط العدد الكبير من مختلف الآثار التي تركتها الجسيمات الكونية على الالواح الفوتوغرافية ، وجود آثار جسيمات مجهولة ذات كتل تزيد بحوالي ألف مرة على كتلة الالكترون .

وقد اتضح وجود ثلاثة انواع من ميزونات ـ ك هي : الموجبة والسالبة والمتعادلة . كما تحدد مقدار لف ميزونات ـ ك ايضا وهو يساوي الصفر . وبدا لاول مرة ان اسرة ميزونات ـ ك لا تختلف في شيء ، سوى بمقادير كتلة الجسيمات ، عن اسرة ميزونات ـ باي الاكثر خفة منها : التي مقدار لفها يساوي الصفر ، ومجموعات الجسيمات الثلاثية ، وكل ما في الامر ان ميزونات ـ ك المتعادلة هي اثقل وليست اخف من شقيقاتها .

وراقب الفيزيائيون الآثار التي خلفتها ميزونات ـ ك على الالواح الفوتوغرافية . اذ كونت الجسيمات المشحونة آثارا اعتيادية غالبا ما

تنتهى مخلفة فى نفس المكان آثارا رفيعة بدرجة اكبر . وعرف الفيزيائيون معنى ذلك . فان ميزونات ـ ك كانت تنحل الى جسيمات أخف . وقد بينت دراسة هذه الآثار الثانوية بانها تعود الى ميزونات ـ باى .

واجريت نفس الابحاث ، ولكن بدرجة اكثر صعوبة ، على انحلال ميزونات ـ ك المتعادلة. وهنا اصابت الفيزيائيين الدهشة ايضا من مفاجأة الموقف ، عندما وجداو أثرين وثلاثة آثار احيانا ممتدة من النقاط التى تمثل نهاية حركة ميزون ـ ك . ان هذه الآثار هى كسابقتها قد ولدتها ميزونات ـ باى .

وهكذا فان ميزونات ـ ك المتعادلة قد انحلت الى ثلاثة ميزونات ـ باى واحيانا الى اثنين . وبالمناسبة فانها مثل جميع الجسيمات الاخرى قد انحلت الى نفس الجسيمات الوليدة وبطريقة وحيدة لا غيرها .

لكن الفيزيائيين كانوا واثقين بان النتيجة لابد وان تكون بهذا الشكل ، وقد أدى اعتقادهم هذا الى انهم قرروا ادخال نوعين متعادلين ومختلفين من ميزونات ـ ك . وقد سمى الاول باسم ميزون ـ تو والآخر باسم ميزون ـ ثيتا . وهكذا فلدينا ميزونان مختلفان ، وطريقتان مختلفتان فى الانحلال . وبدا ان كل شىء على ما يرام .

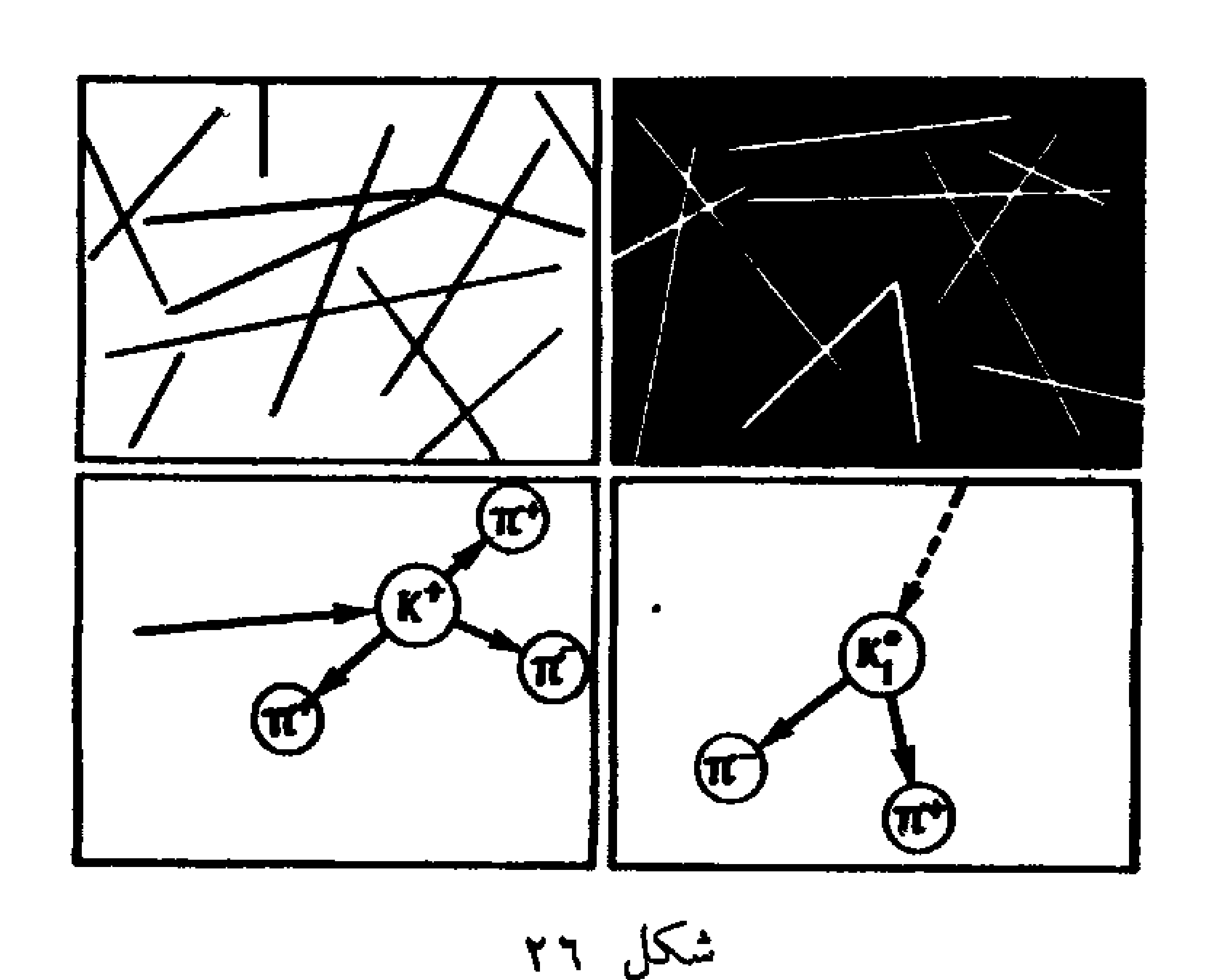
غير ان الفيزيائيين لم يقنعوا بهذه النتيجة . فاظهرت اعمال القياس الشديدة الدقة بان ميزون ـ تو وميزون ـ ثيتا لهما نفس الكتلة تماما . وكان ذلك يعنى فى جدول الجسيمات كله شيئا واحدا ، هو

ان كليهما يمثلان جسيما واحدا . ولكن لا يجوز ان ينحل جسيم واحد الى جسيمين وليدين مرة ، والى ثلاثة جسيمات مرة اخرى !

ولذلك سمى ميزون — ك فى بداية الخمسينيات بانه اكثر الجسيمات غموضا فى الفيزياء. وظهر اللغز الشهير « تو — ثيتا » .

ولكن اين الغموض فى هذه المسألة ؟ ولماذا لا يستطيع ميزون — ك ان ينحل بنفس الطريقة التى ذكرناها سابقا ؟ فان قانون حفظ الطاقة لا يمنعه من ذلك ، وكذلك قانونا حفظ الدفع واللف .

ومع ذلك فان التحريم لا يزال قائما . ويتمثل فى القانون الذى آثرنا عدم الحديث عنه حتى الوقت الحاضر . فلم تكن هناك ضرورة لذلك . وها قد برزت الآن . ان هذا التحريم الذى اصدرته ميكانيكا الكم يحمل اسم قانون حفظ التماثل (the law of conservation of parity) .



شكل ٢٦

هل هناك اختلاف بين اليسار واليمين ؟

لنسترجع في ذاكرتنا انبعاث الفوتونات من قبل الذرات التي جرت اثارتها . ويكون الالكترون موجودا في حالة معينة ثم يقفز الى حالة اخرى ذات طاقة اقل . وكانت تهمنا عند ذاك الطاقة لوحدها ، وكذلك فيما اذ كانت « سحب الاحتمال » تغطي الحالة الابتدائية والنهائية للالكترون .

وقد ظهر بان هذه التغطية ترتبط أشد الارتباط بالتماثل . ولو استطعنا اعادة ترقيم الشقق في الذرة لا تضح لنا بان سكان الذرة يستطيعون في كل مرة ينتقلون فيها ان يغيروا رقم شقتهم من رقم زوجي الى فردي فقط . ومن المستحيل انتقال الالكترون من شقة رقم ١٠ الى شقة رقم ٨ .

ان هذه القاعدة التي ثبتت صحتها بالتجربة منذ عام ١٩٢٤ قد جرى تفسيرها فيما بعد من قبل ميكانيكا الكم . ولهذا الغرض استحدث الفيزيائيون مفهوم التماثل في الدالة الموجية . وبعد ذلك طبق مفهوم التماثل على الحالة التي تفسرها الدالة الموجية نفسها .

ونحن نعرف معنى دالة الموجة فهي : حل علاقة شرودنجر . ولابد من الحديث عن التماثل بالتفصيل .

فيحدث في احيان كثير ان المرء عندما يتطلع الى صورته الفوتوغرافية ان يقول منزعجا « انها لا تشبهني ابدا» . ثم يضع اللوم طبعا

على المصور الفوتوغرافى الذى لا يتقن مهنته . ولكن قد لا يلام المصور فى كثير من الحالات .

فاننا نستطيع التطلع الى انفسنا بواسطة المرآة . لكن المرآة لا تعطى صورة دقيقة للشيء كما هو فى الواقع ، على عكس ما هو معروف . فلو كان الانف يميل قليلا الى اليمين فانه يبدو فى المرآة مائلا الى اليسار . ففى المرآة يحل اليمين محل اليسار ، وبالعكس ، دائما .

وعندما يصور المرء فتبدو صورته المرآوية على الجانب الامامى للفلم الفوتوغرافى . لكن الامر لا ينتهى عند هذا الحدّ . فيجب تحميض الفلم ، وعمل صورة موجبة من الصورة السالبة ، اى عكس الصورة فى المرآة من جديد . ويحدث احيانا لدى تصوير النسخة الموجبة ان تقلب الصورة السالبة ، فنحصل عندئذ على ثلاث صور مرآوية . ويحدث فى حالات اخرى ان الصورة السالبة تبقى فى وضعها ، كما كانت لدى التقاط الصورة ، فيكون عدد الصور المنعكسة عندئذ اثنين فقط .

ان المرء لا يبدو من جانب كما فى المرآة مطلقا . وقد تجعلك الصورة الفوتوغرافية شبيها بما انت فى عيون الناس — اى فى واقع الحال .

ولا يجرى تطابق الصورتين الفوتوغرافية والمرآوية الا فى حالة واحدة ، وهى لدى كون وجه الشخص متماثلا بشكل مثالى مطلق . وهو شى ء نادر جدا . ان الطبيعة تحب التماثل المجرد فى الترتيب عموما لكنها لا تتوانى عن احداث شيء من الاختلافات .

والامر الاساسى هنا هو ان الانعكاس المزدوج يعمل دوما ، وبغض النظر عن وجود التماثل او عدمه ، على اعادة شكل الشيء الى ما كان عليه في الاصل . فكما ان الناقص مع الناقص يعطى زائدا فان الزائد مع الزائد يعطى زائدا ايضا . وعند حدوث الانعكاس المزدوج في المرآة فان جميع « الناقص » في صورة وجهك (عدم التماثل) لا يؤدى الى تشويه الصورة .

وتمتلك دوال الموجات نفس خصائص المرآة هذه . وتكون هذه الدوال رياضية عادة ، وكثيرا ما نجد فيها الجيوب وجيوب التمام . فقم برسمها على ورقة ثم ضعها امام مرآة . فسترى عندئذ بان الجيب قد انقلب « الى الجانب الآخر » ، واصبح عاليه اسفله . وهذا ليس بالشيء الجديد : فمن دراستنا للمثلثات في المدرسة نعرف بان جيب الزاوية السالبة يكافيء جيب تمام الزاوية الموجبة ، ولكن باشارة معاكسة . ويبدو كما لو أن مرآتنا تلك تمدد محور الزاوية باتجاه قيمها السالبة . اما جيب التمام فلايغير وجهه في المرآة . ويثبت علم المثلثات هذه الفكرة .

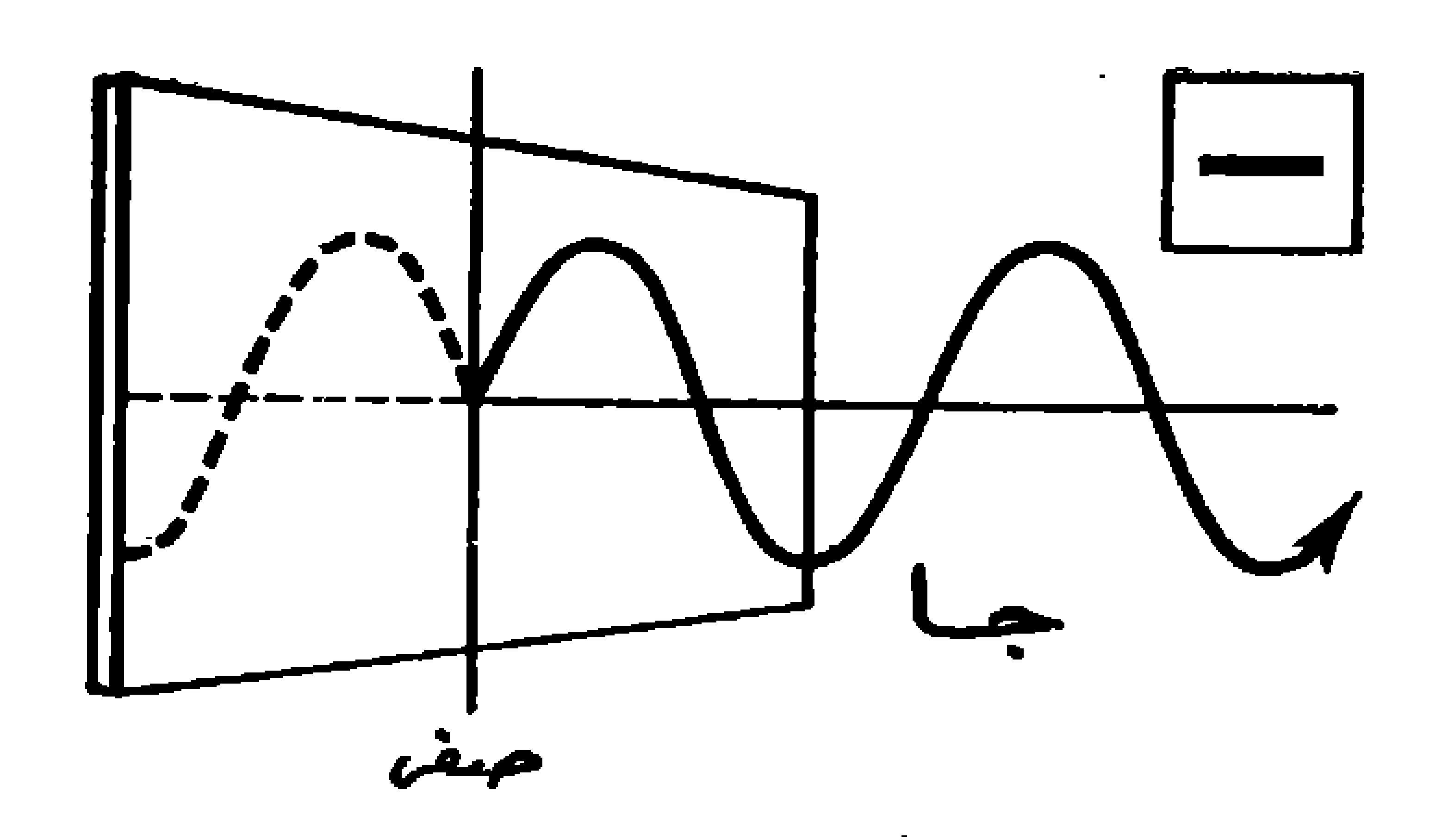
وقد سمى علماء الرياضة جيب التمام بالدالة الزوجية والجيب بالدالة الفردية . كما اطلقت على صورتهما المنعكسة في المرآة تسمية التعاكس الفراغي (space inversion) . ولغرض التمييز بين الدالات الزوجية عن الدالات الفردية فقد وضعت لها علامات افتراضية : فالاولى بعلامة زائد (لسلوكها الطيب) والثانية علامة ناقص

واذا ما نظر الى صورة الجيب المنعكسة فى مرآة بواسطة مرآة اخرى فانها تعود الى وضعها الاصلى . وصحيح « ان الناقص مع الناقص هو زائد » . ومن المفهوم ان ذلك لا يتم فى حالة جيب التمام فيبقى على حاله .

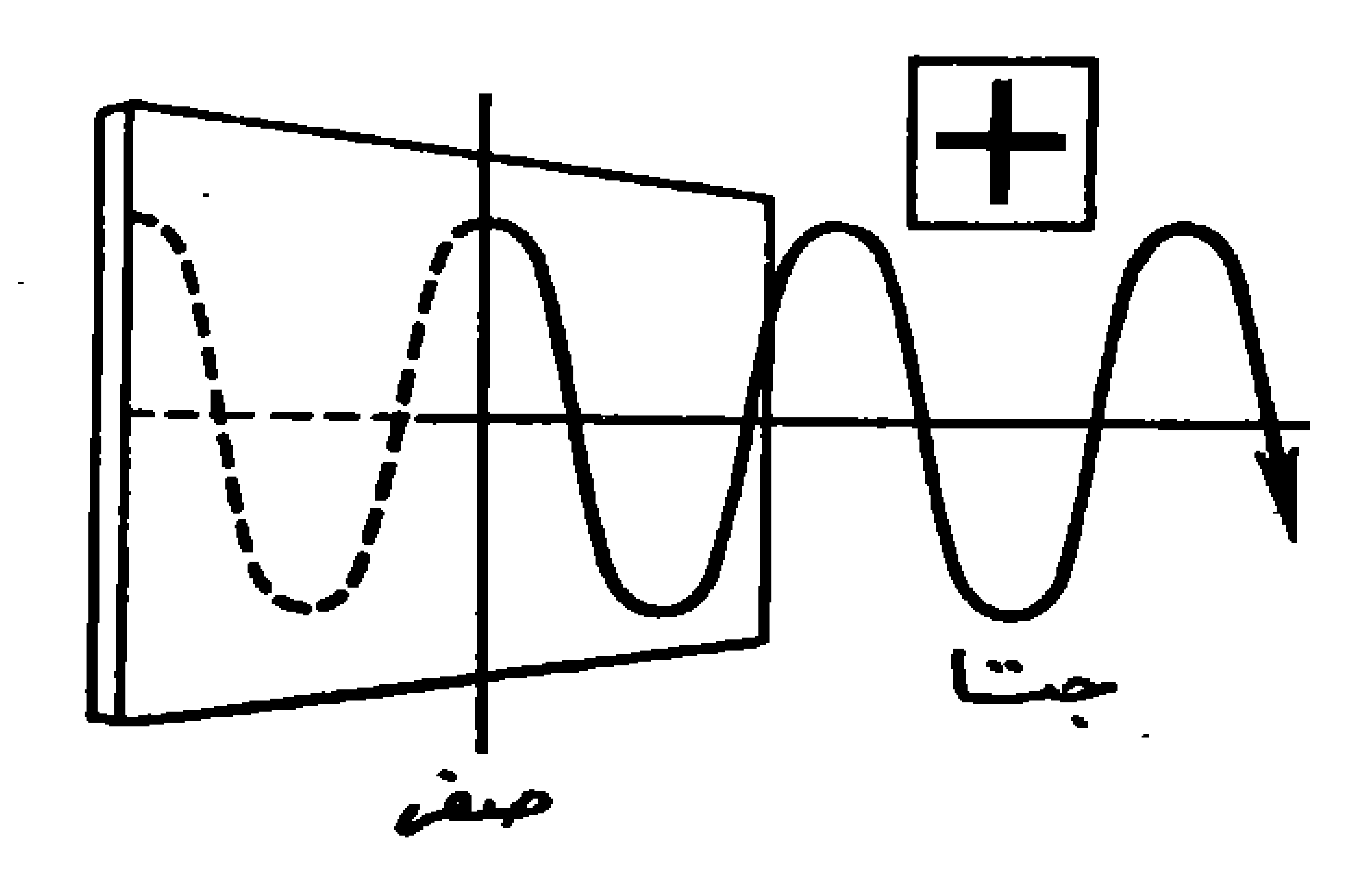
وقد اظهرت دراسة علاقة شرودنجر للالكترونات الذرية بان تماثلها لا يتغير اثناء القفز من حالة الى اخرى ابدا . واذا ما كانت الدالة الموجية للالكترون زوجية فى البداية ثم اصبحت بعد القفز فردية ، فمعنى ذلك ان الدالة الموجية الفردية التى ظهرت عندئذ تعود الى الفوتون .

وبمرور الزمن انتقل مفهوم التماثل من حالات الذرة الى الجسيمات المنفردة . وبدأ ذلك بالفوتون ، ثم ظهرت العلامات المميزة على الجسيمات الاخرى . فظهر ، على سبيل المثال ، بان الالكترون جسيم فردى .

وقد بينا اعلاه بان لف الالكترون يتجه بشكل محدد بالنسبة لاتجاه حركته . فاذا ما تحرك الالكترون ، مثلا ، الى اليمين فان لفه يتجه نحو الاعلى ، واذا ما تحرك الى اليسار فان اتجاه اللف يكون الى الاسفل . وسنرى بانه لدى حركة الالكترون نحو اليمين (فى المرآة — نحو اليسار) فان لفه يبدو فى المرآة متجها الى الاعلى كالسابق . لان المرآة لا تغير سوى اليسار الى اليمين وبالعكس ، دون ان تقلب الصورة رأسا على عقب . ويكون اتجاه لف الالكترون



شكل ٢٧



شكل ٢٨

المرآوى مغايرا لاتجاه لف الالكترون الحقيقى . وهذا يعنى بان الالكترون جسيم فردى بشكل واضح . فلو كان زوجيا لبدا فى المرآة كما هو حالة فى الواقع .

وان ميزون — باى هو جسيم فردى .

وعندما طبق الفيزيائيون هذا التقسيم فى التماثل على الجسيمات غير المستقرة ، وجدوا بالتشابه مع الفوتون الذى يبعثه الالكترون بان

تماثل الجسيم الاولى يجب ان يكون حاصل ضرب التماثلات لكل الجسيمات المتكونة منه لدى الانحلال . ان الجسيمات لم تخالف هذا الامر حتى الآن . وقد اطلق عليه اسم قانون حفظ التماثل .

والآن لدينا ميزون ــ باى المتعادل ! فبالنظر لكونه ينحل الى ميزونى ــ باى ــ فانه جسيم زوجى (لان الناقص مع الناقص يعطى زائدا) . وان انحلاله الى ثلاثة ميزونات ــ باى يدل على ان هذا الجسيم فردى (فالناقص مع الناقص ومع الناقص هو ناقص) . فما هو فى الحقيقة ــ زوجى ام فردى ؟

ومن الواضح انه جسيم واحد لا اثنان ، وذلك لتطابق كتلتى ميزونات ــ تو وميزونات ــ ثيتا الى درجة كبيرة . لكننا نستنتج عندئذ بان هذا الجسيم (ميزون ــ ك) هو جسيم « مزدوج التماثل » ! كلا ، كلا ، لا يمكننا السماح بذلك باى شكل من الاشكال ! فمعنى ذلك انه سيان عندنا اعتبار المرآة المحدبة مستوية !

لقد وضعت ميزونات ــ ك ميكانيكا الكم فى وضع صعب !

ايجاد المخرج ... وما أعجبه !

فما العمل ؟ هل نعترف بان التماثل لا يتم فى حالة انحلال ميزونات ــ ك المتعادلة ؟ لكن هذا يعنى بان الطبيعة تستخدم مرآة مشوهة ! ويختلف فى هذه المرآة اليسار عن اليمين ، ويكون الفراغ نفسه غير متماثل ! ان هذا الاستنتاج يبعث على الرعب !

وقد اعتادت الفيزياء خلال سنوات وجودها الطويلة على ان جميع الاتجاهات فى الفراغ واحدة . والحركة الى اليسار تحت نفس الظروف لا تختلف فى شيء عن الحركة الى اليمين . وتشير جميع قوانين الفيزياء الى مساواة الاتجاهات ، وهو ما يسمى بتوحّد خواص الفضاء او الفراغ (isotropy of space) .

والعدول عن هذه الفكرة يعنى انكار القوانين الاساسية والرئيسية للفيزياء ، وقلبها رأسا على عقب . وهو شيء يثير الرعب .

وقد وجد العالمان الفيزيائيان الشابان لى (Lee) ويانج (Yang) مخرجا رائعا آخر من هذا الموقف الصعب . فاعلنا بجرأة : نعم يمكن الاخلال بفكرة التماثل فى انحلال ميزونات– ك ، وكذلك فى جميع عمليات تبادل الفعل الضعيفة (التى تبعث انحلال الميزونات وانحلال بيتا لنيوترونات النوى) !

واشار لى ويانج الى التجارب التى يجب ان تثبت بشكل لاغموض فيه هذه الظاهرة المحيرة . وهى تستحق الوصف .

. فقد اظهرت الحسابات بانه اذا ما اخلّ بالتماثل فعلا ، فانه يجب فى حالة انحلال بيتا للنوى ان تتطاير منها الالكترونات باتجاه يعاكس ، على الاغلب ، الاتجاه الذى يشير اليه لف النواة . بينما نجد فى الظروف الاعتيادية ان النوى توجه لفها كيفما اتفق ، وتتطاير الالكترونات منها بجميع الاتجاهات .

لذلك فقد وجب قبل كل شيء وضع النوى بشكل يجعل جميع

لفوفها تتجه باتجاه واحد ، والاحتفاظ بهذا الترتيب للنوى طيلة وقت اجراء التجربة بأمر « الاصطفاف » . ولهذا الغرض وضعت قطعة المادة ذات فاعلية بيتا الاشعاعية فى مجال مغناطيسى قوى ، جعلت مغانيط اللف للنوى تترتب فى صف معين . ولضمان عدم اخلال الحركة الحرارية للنوى بهذا الترتيب ، جرى تبريد المادة الى درجة حرارة واطئة جدا — حتى ٠٫٠٥ درجة فوق درجة الصفر المطلق فقط .

ثم وضعت حول هذا الجهاز عدادات للالكترونات تمبل بزاوية صغيرة باتجاه لفوف النوى وباتجاه « مرآوى » بالنسبة له . ثم جرى تشغيل العدادات وبدأ قياس حساباتها . فلوحظ بسرعة بان العدادات حسبت فى الاتجاه الامامى عددا اقل بكثير من الالكترونات من العدادات فى الاتجاه « المرآوى » . وهكذا ثبتت تنبؤات لى ويانج .

فهل يعنى ذلك بان الفضاء هو مرآة مشوهة للطبيعة ؟ اى ان قوانين الفيزياء الاساسية تنقلب رأسا على عقب ؟ وهنا قام لى ويانج ، وكذلك العالم السوفييتى الكبير لانداو بمعزل عنهما ، بخطوة حاسمة . فقالوا بان الفضاء لا علاقة له بالامر . وان مجمل الموضوع ينحصر فى الجسيمات نفسها .

ويتذكر القارئ كيف قمنا بعكس الالكترون فى مرآة وحصلنا على الكترون لا وجود له ، ذا اتجاه لف معاكس . لقد ظهر بان هذا الالكترون موجود فى الواقع ، لكننا نحتاج الى « عكس »

شحنته الكهربائية ايضا ، وتغييره الى عكسه . فيتكون انعكاس دقيق للالكترون وهو البوزترون المعروف !

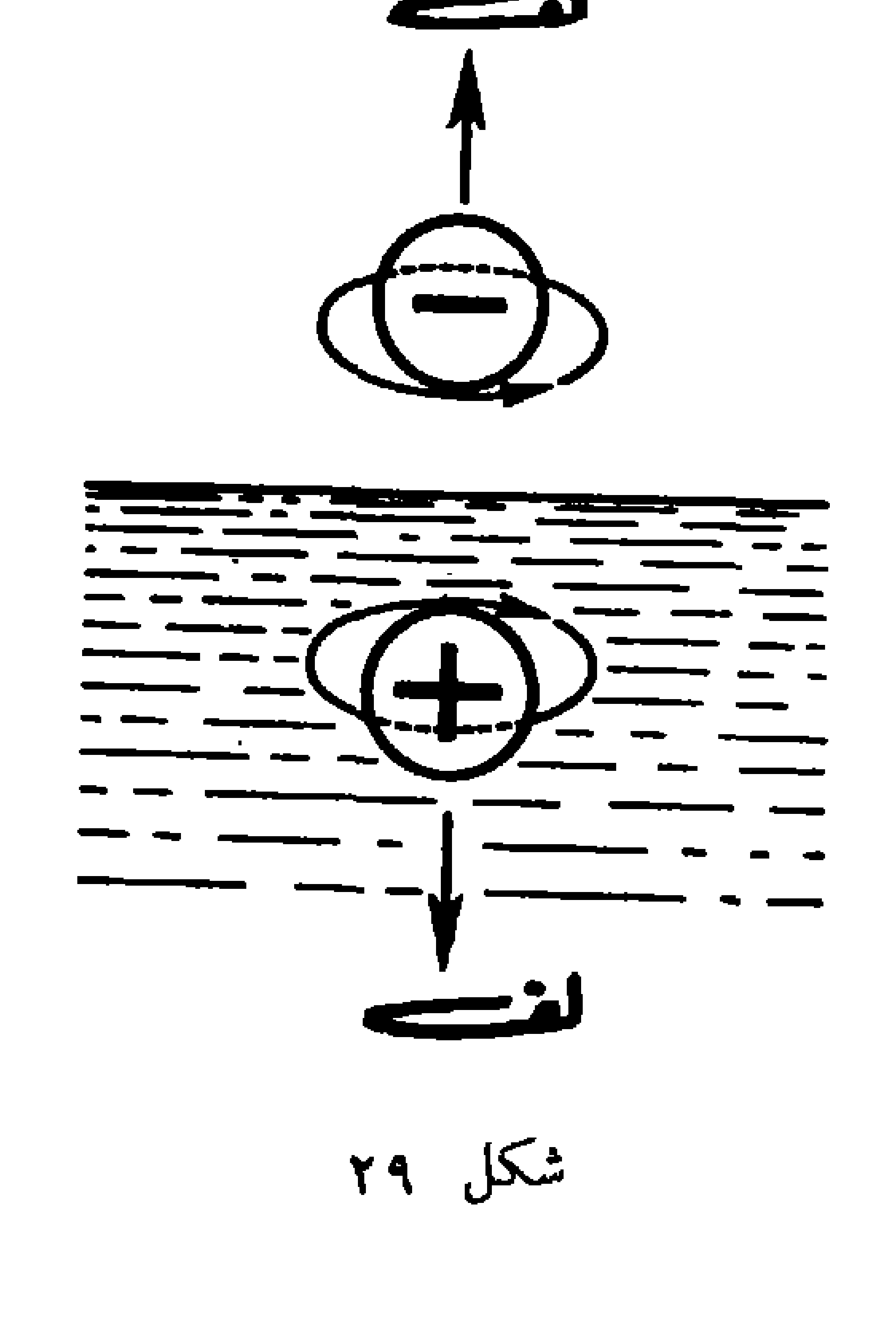
وبذلك نرى بان مرآة الطبيعة مستوية وغير مشوهة ! لكنها نوع من المرايا المزدوجة : فهى تعطى دائما لدى عكس الجسيمات اضدادها ! فيتكون البوزترون مقابل الالكترون ، ومقابل ميزون ــ ك المتعادل ، الذى اثار كل تلك الضجة ، ضديد ميزون ــ ك .. وهو متعادل ايضا !

ولقد ظهر بان ميزونات ــ ك المتعادلة التى لوحظت فى التجربة هى مزيج من جسيمين : ميزون ــ ك الصفرى وضديده . لكن ميزون ــ ك الصفرى فردى بينما ضديده زوجى . وفى ذلك بالذات يكمن لغز « تو ــ ثيتا » .

وقد قام باكتشاف هذا الانعكاس المزدوج الذى سمى علميا بـ « العكس الموّحد » (combined inversion) نفس العالمين لى ويانج . وشاركهما شرف القيام به ، وبمعزل عنهما ، العالم لانداو الذى توصل الى نفس النتيجة .

وهكذا ثبت نهائيا وبدون لبس بان لف الجسيم يمكن ان يتجه بطريقة محددة فقط بالنسبة لاتجاه حركة الجسيم ، وبشكل معاكس لما هو عند ضديده . واذا ما افترضنا ولو للحظة صغيرة بان اللف هو تعبير عن « الدوران الذاتى » للجسيم ، لكان الامر على هذه الصورة . لنفترض باننا وضعنا علامة ما على « سطح » الالكترون ثم تابعناها

لدى حركة الالكترون ، باستعمال « التصوير السينمائى السريع الى اقصى حد » مثلا . فسنرى بان العلامة تمثل حلزونا ، ويدور هذا الحلزون فى حالة الالكترون نحو اليمين . بينما تمثل علامة البوزترون حلزونا يدور نحو اليسار .



شكل ٢٩

ان الخلاف بين الجسيمات واضدادها يكمن فى نهاية الامر فى اختلاف الحلزنة او دوران الحلزون بالذات . ومما لا شك فيه ان مفهومى الايمن والايسر هما مفهومان نسبيان ، مثل مفهومى الموجب والسالب . ويمكن الافتراض بان الجسيمات ذات « حلزنة » يمنى ، واضداد الجسيمات ذات « حلزنة » يسرى .

العوالم واضداد العوالم

قلنا بان البوزترونات ضيوف نادرة فى العالم المحيط بنا . ويمكن الاستنتاج من ذلك بشكل خاص بان عالم الجسيمات غير متماثل : فان الحلزنة اليمنى توجد اكثر من اليسرى .

وليس فى ذلك أمرا عجبا . ويكفى ان نلقى نظرة على عالمنا اى عالم الاشياء الكبيرة لنتيقن من ذلك . فان القوقعة تكون فى غالب الاحيان ذات « حلزنة » يسرى : لان الصدفة ملفوفة باتجاه اليسار . وتوجد فى الفيزناء جزيئات اسمها الجزيئات الايسومرية المجسمة (stereoisomeric molecules) التى هى انعكاس مرآوى لاحدها للآخر . وكثيرا ما تلاحظ بينها ايسومرات يمنى تارة او يسرى تارة اخرى . واخيرا فان قلب الانسان يوجد فى الجانب الايسر من الجسم عادة ، بينما نلاحظه لدى الناس « المرآويين » الذين يكون موضع اعضائهم الداخلية معكوسا ، فى الجهة اليمنى . ولكن ذلك امر نادر جدا . ونلتقى احيانا بافراد يستخدمون ايديهم اليسرى اكثر من اليمنى ، ولو ان اليد اليمنى هى الاقوى عموما .

لذا فلا يجب ان تثير العجب فكرة امكان وجود عوالم مضادة فى عالم الفضاء الكبير ، ويكون كل شىء فيها مضادا لما هو مألوف. فتتحرك هناك البوزترونات فى اضداد الذرات حول اضداد النوى المؤلفة من اضداد البروتونات واضداد النيوترونات . وتوجد هناك ايضا اجسام حيّة ، اذا ما وجدت وكانت شبيهة بما توجد فى عالمنا ، فانها يجب ان تكون صورا مرآوية للاجسام الحية على الارض .

ويجب ان لا تختلف قوانين العالم الضديد فى شىء عن قوانين عالمنا ، اذا ما وجد كلا العالمان فى ظروف واحدة . لكنها ستكون جميعا بعلامات معكوسة اذا امكن قول ذلك . لذلك فانه حتى فى

حالة وجود العالم الضديد تحت اقدامنا ، فاننا لا نستطيع التكهن بوجوده .

وكل ما يمكننا معرفته هو الحد بين العالم الاعتيادى والعالم الضديد . ونجد فى هذا الحد ضيوفا من كلا العالمين . ولا يمكن ان تتم لقاءات تتصف بعداء اكبر مما نجده هناك ، فى الدنيا اجمع . وللقى ساكن عالمنا ، وحتى لو كان مفعما بروح الصداقة تجاه العالم الضديد ، بنفس الاسلوب دائما : فسيتحول كليا اما الى ميزون ـ باى واما الى ميزون ـ ك واما الى فوتونات جاما النشيطة ، المتطايرة فى جميع الاتجاهات من محل اللقاء . وستحيط بالحد الفاصل بين العالمين ، مشيرة الى الحد الرهيب فى طريق كل جسيم يتجاسر على اقتحام العالم المعاكس . ولم يعثر العلماء بعد على مثل هذا الحد فى مجموعتنا الشمسية (وربما فى المجموعات النجمية الاكثر اتساعا) .

ماذا يحدث داخل الجسيمات ؟

سنبدأ حديثنا من السؤال الذى طرحناه مرارا من قبل دون الاجابة عليه ، وهو : ما هى المقاييس الدقيقة للجسيمات الدقيقة ؟ وهل توجد مقاييس دقيقة لها بشكل عام ؟

وقد يقول القارئ الذى لا علم له بالامر : « ما هذا السؤال ؟ ان لجميع الاشياء فى الكون مقاييس » .

لكن مثل هذا الجواب لا يبدو لقارئ كتابنا واضحا تماما .

فقد اضطر الفيزيائيون خلال فترة طويلة الى الاعراض عن بحث هذه المسألة بصورة جوهرية . فمن ناحية ان النظام الرياضى لميكانيكا الكم نفسه كان يقف عاجزا حالما كانت الجسيمات تكتسب ابعادا ما . ومن ناحية اخرى ، وكما رأينا ذلك من قبل ، فليست هناك اية امكانية لقياس ابعاد الجسيمات ، اذ تقف عثرة فى طريق ذلك الصفات الموجية التى « تبعثر » الجسيمات فى الفراغ .

والصفات الموجية هى تعبير « خارجى » عن العلاقة المتبادلة بين الجسيمات ومجالاتها . وبتعبير آخر ان الالكترون « يتبعثر » — يتلطخ — بفضل تبادل الفعل بينه وبين الجسيمات الاخرى ، وبضمنها الالكترونات .

ونحن نعرف الآن كيف يتصور الفيزيائيون تبادل الفعل هذا. فالالكترون يبعث الفوتونات افتراضا ، وتقوم هذه بتبادل الفعل مع الفوتونات المنبعثة من الجسيمات الاخرى . وفى النتيجة اما ان يتكون تنافر متبادل واما جذب متبادل بين الجسيمات . ويكون الالكترون كما لو احيط من كل الجوانب بسحابة الفوتونات الافتراضية ، التى يبعثها ثم يبتلعها من جديد . وليس لهذه السحابة حدود : فتوجد دائما فوتونات ذات طاقة ضعيفة تتيح لها علاقة هيزنبرج الابتعاد عن الالكترون الذى تنبعث منه الى اية مسافة . ان السحابة الفوتونية

« تبعثر » او تلطخ الالكترون فى كافة ارجاء الفضاء دون ان تسمح بذكر ابعاده الدقيقة .

ومع ذلك فانها سرعان ما تتكثف لدى اقترابها من « لبّ » السحابة . فتظهر امامنا صورة الالكترون « المرتجف » فى المسافات التى تكتسب فيها الفوتونات الافتراضية طاقة كافية لتكوين ازواج الالكترونات — البوزترون (وهى تبلغ حوالى ١٠ ^-١١^ سم) . وهنا لا يمكن ايضا تعيين ابعاده بدقة ، لان الالكترون « مبعثر » كالسابق ، ولو فى حيز اصغر نسبيا من الفراغ .

وهل يمكن قياس ابعاد الالكترون « العارى » ، الخالى من السحب الفوتونية والالكترونية — البوزترونية بدقة ؟ كلا ، فهذا شىء مستحيل . اذ لا يمكن العثور فى الطبيعة ابدا على الالكترون « العارى » — اى المتحرر من تبادل الفعل . ولا يمكن وجوده فى اية ظروف . ان الجسيم نفسه وتبادل فعله هما شيئان يكونان وحدة لا تنفصم !

وان كل ما يتبقى لدينا هو الافتراض بانه يوجد داخل جميع هذه السحب شىء كالقلب ، او ما يسميه الفيزيائيون باللب . ولكن ما هو مظهر اللب ، والادهى من ذلك ماذا يجرى داخله ؟ من الصعب الاجابة على ذلك حاليا .

وبنفس الطريقة يحاول الفيزيائيون تصوير تركيب جسيم اساسى آخر هو البروتون . فالبروتون يبعث افتراضيا ميزونات — باى ، التى

لا يمكن ان تقل عن طاقة السكون . لذلك فان مدة بقاء ميزونات ــ باى قصيرة جدا . وهذا يعنى بان المسافة التى يمكنها ان تبتعد بها عن البروتون المكون لها قصيرة ايضا .

وفى الواقع ، وكما نذكر فان ابعاد ــ سحابة ميزونات ــ باى حول البروتون هى قليلة جدا ــ بحدود ١٠-١٣ سنتيمترا . ويختلف البروتون عن الالكترون فى كونه « مبعثرا » بقدر قليل جدا من قبل ميزونات ــ باى . لذلك فلا بد ان تظهر لدى البروتون سحابة افتراضية اخرى ، تناظر تبادل الفعل هذا لميزون ــ ك . وبما ان طاقة السكون لميزون ــ ك تزيد بثلاث مرات اكثر من طاقة السكون لميزون ــ باى ، فان سحابة ميزون ــ ك يجب ان تكون ذات ابعاد اقل بنفس القدر . ويجب ان تكون داخل سحابة ميزون ــ باى . ويجب ان يتركز بشكل اعمق البروتون « المرتجف » الذى ينحل افتراضيا الى ازواج مؤلفة من بروتون وضديد البروتون .

وقد توصل علم الفيزياء على هذا الاساس الى استنتاج عجيب ، ولكن لا مفـرّ منه ، هو ان تركيب جسيمات الاشياء الدقيقة هو انعكاس لجميع تبادلات الفعل بين الجسيمات . ويتبين من ذلك بان جوهر الجسيمات الدقيقة متحرك جدا وسهل التغير .

الا ان هذا الاستنتاج لا يبدو لنا غريبا اذا ما عرفنا بان الجسيمات لا تتواجد بدون تبادل فعل بشكل عام . فان جميع الجسيمات ترتبط ببعضها البعض بالشكل مختلفة من تبادل الفعل . ولا يتم تبادل

الفعل بواسطة تأثير خارجى ما ، بل هو جزء متمم وطبيعى لتركيب الجسيمات نفسها .

نعم ، ان تركيب الجسيم فى اية لحظة انما يتحدد بصورة فعلية بكل اشكال تبادل الفعل الموجودة فيه . وبالعكس فان طبيعة ودرجة تبادل الفعل تتحددان بتركيب الجسيم . وهذه هى الروح الديالكتيكية الجوهرية للمادة والمجال ، والصفات الحقيقية للجسيمات وتبادلات الفعل فيها ، والعمومية غير القابلة للتجزأ للجسيم الدقيق جدا ... والكون باجمعه !

وعلى اى حال فلا بد من الاعتراف بان وسائل التفكير العلمى لا زالت بعيدة عن ان تكون قائمة جميعها على اساس المنطق الديالكتيكى . وما دعوناه بالرابطة الديالكتيكية المتبادلة لتركيب الجسيمات ، وما تعنيه من انواع تبادل الفعل ، والرابطة بين المادة والمجال ، هى امور يصفها الفيزيائيون بحرقة وألم بالدائرة الشريرة المسحورة .

ومع ذلك فيبدو انه سيحين الاوان ، عاجلا او آجلا او آجلا ، للخروج من هذه الدائرة . وحتى الآن لم يجد التجريبيون سوى منفذا ضيقا ، وبالطبع فقد دسّ النظريون انوفهم ، فضولا ، فيه فورا .

وان ما تسنى معرفته خلال الاعوام الاخيرة قد بعث فى قلوب « متصيدى » الجسيمات الآمال الكبار ... آمال فى تحقيق شيء من النظام فى تصوراتنا حول عالم الجسيمات .

« الرنينات » الغامضة

لنتحدث عن الموضوع بحسب تسلسله .

لقد تم العثور في وسط الغنائم الثمينة التي وجدها الفيزيائيون في اوائل الخمسينيات على مجموعة من التراكيب الغريبة . فهل هي جسيمات ؟ كلا ، فلقد كان العلماء لا يقبلون بتسميتها بالجسيمات .

فاحكم ايها القارئ بنفسك . اذ حصل باحث باستخدام معجل على جراف من البروتونات النشيطة جدا . وعندما وجه هذا الجراف على هدف يحتوي على بروتونات في تركيبه ، ابتعث الهدف حزمة من الجسيمات الجديدة الحديثة التكوين ، ومن بينها الكثير من ميزونات - باي .

فقام الباحث بفصل ميزونات - باي في حزمة منفردة ، ثم وجه ميزونات - باي هذه بدورها على هدف آخر ، يحتوي على البروتونات ايضا . فكيف ستتصادم ميزونات - باي مع البروتونات ؟ وماذا سيحدث عندئذ ؟

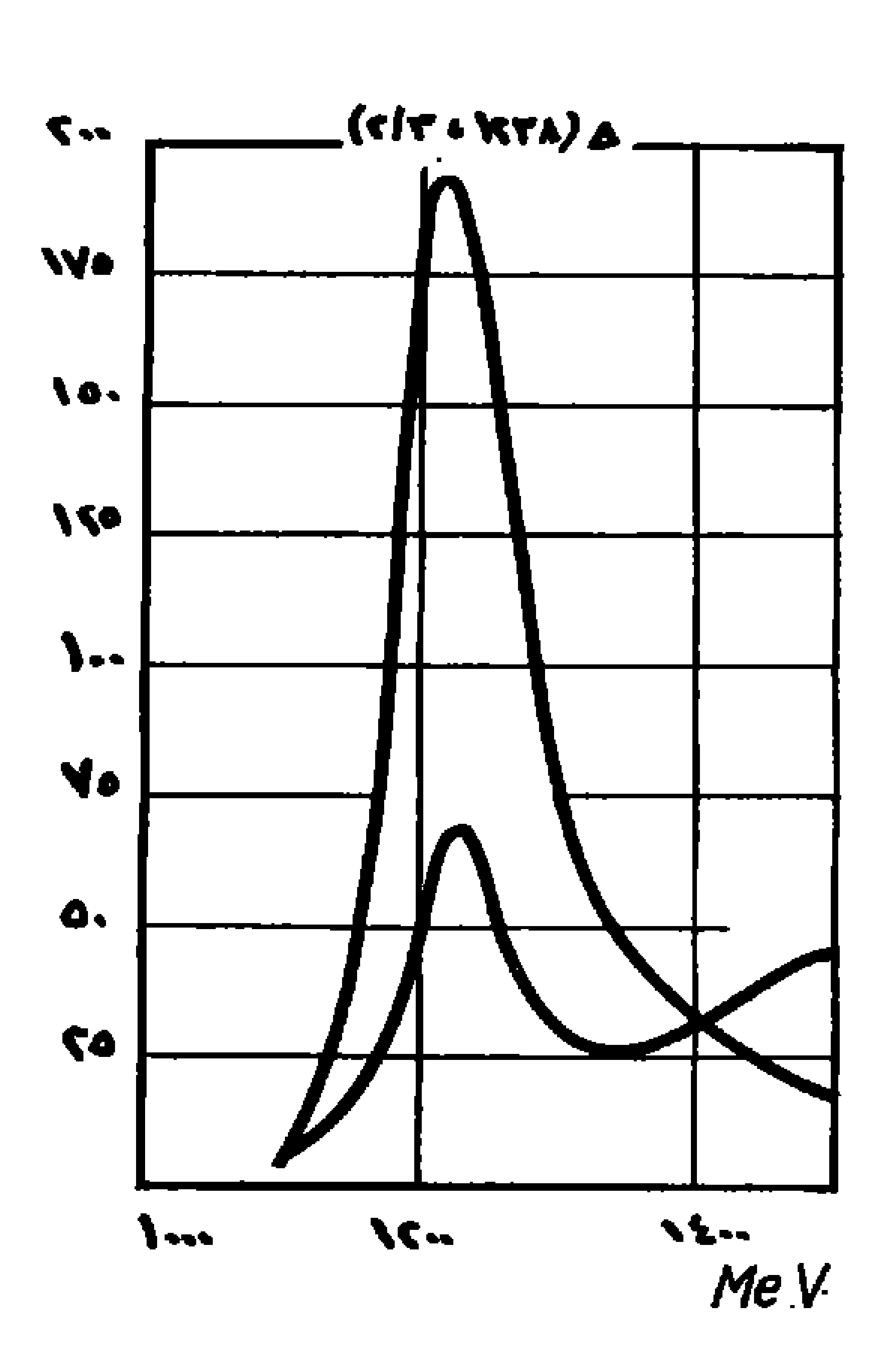
ونحن نعرف ذلك الآن . ففي اللحظة الخاطفة لالتقاء ميزونات - باي مع البروتونات ، فانها تبعث الحياة في كمية كبيرة من الجسيمات الجديدة . ومن بينها ميزونات - ك والهيبرونات الاكثر ثقلا . وبذلك يستطير جزء كبير من الحزمة .

وقد ابدى الفيزيائيون اهتماما كبيرا بهذه الاستطارة . اذ انها

تعد بالقاء الضوء على طبيعة القوى المؤثرة بين ميزونات ـ باى والبروتونات . وهى ، كما عرفنا فيما سبق، القوى النووية.

وفى البداية بدا كما لو أن هذه الاستطارة تدخل فى نطاق احدى النظريات المعروفة من قبل الفيزيائيين .

ولكن حدثت مفاجأة غير متوقعة. فلدى طاقة معينة ازدادت حصة استطارة ميزونات ـ باى بغتة بدرجة شديدة . ثم اعقب ذلك عودة الامور الى سابق عهدها، بازدياد طاقة الميزونات باستمرار. وظهر فى منحنى علاقة مقطع الاستطارة بطاقة الميزونات ارتفاع او تحدب صغير . وقد اوردنا هذا المنحنى فى الشكل المرفق .



شكل ٣٠

وقد كان اول من رأى مثل هذا التحدب هو انريكو فيرمى فى عام ١٩٥٢ . فعندما ارسل حزمة ميزونات ـ باى ، المتكونة فى معجل جامعة كاليفورنيا ، على هدف من البروتونات لاحظ انه عندما تكون الطاقة حوالى مليار وربع الكترون ـ فولت تبدأ الميزونات

فجأة بالاستطارة بشدة بواسطة البروتونات . وقد كانت هذه الظاهرة تشبه الرنين الى حد كبير .

لذلك فقد سمى الفيزيائيون التحدب الظاهر فى منحنى استطارة ميزونات ــ باى بالرنين ايضا . وبدا الامر آنذاك بانه مجرد تشبيه سطحي. ولكنه غامض جدا ايضا .

وفى الحقيقة ، علام يدل ذلك التحدب فى المنحنى ؟ فما دام الجسيم يستطير بدرجة اقوى فهذا يعنى بانه يقضى فترة اطول فى جوار البروتون . ويبدو ما حدث وكأنه ابطأ سرعته الخيالية فى التحليق التى تبلغ نصف سرعة الضوء من اجل ان يتطلع الى رفيقه الثقيل بشكل افضل .

ولكن ما هى المدة التى يقضيها الميزون بالقرب من البروتون ؟ ان التحدب فى الرسم البيانى يساعدنا على شرح هذه المسألة ، وبصورة عامة فحسب : فلا يمكن لاية ساعة ان تقيس هذا الزمن . فان حجم البروتون هو $١٠^{-١٣}$ سم تقريبا ، وسرعة تحليق ميزون ــ باى هى حوالى $١٠^{١٠}$ سم/ثانية . مما يعنى بان ميزون ــ باى يحلق الى جوار البروتون خلال $١٠^{-٢٣}$ ثانية تقريبا .

ونحن نعرف هذا الرقم ، فهو مقدار زمن تبادل الفعل . وهذا ما يجب ان يكون عليه الحال. فان تبادل الفعل الجارى بين البروتون وكم المجال النووى ــ ميزون ــ باى ــ هو تبادل فعل قوى فعلا .

وهكذا فان ميزون ــ باى « الرنينى » يتأخر بالقرب من البروتون

لفترة زمنية تقارب ذلك المقدار – اى $١٠^{-٢٣}$ ، وربما اكثر بقليل من توقف الميزون مع الطاقة « الرنينية » المجاورة . وليست هناك اية امكانية فى الوقت الحاضر لتحديد هذا الزمن . وكل ما نعرفه هو مقداره فقط .

ولكن المهم بالنسبة لنا الآن هو حدوث هذا التأخير . ويتساءل علماء الفيزياء : ماذا يفعل الجسيمان فى هذه الفترة الزمنية القصيرة جدا ، هل يلتحمان ام يلتصقان ؟

فيجيب النظريون على هذا السؤال بان الامر غير واضح تماما ، ولكن تظهر عندئذ ، ولسبب ما ، ميزونات – باى . بالمناسبة فان ذلك قد يكون الحالة التى تأخذ فيها طاقة المجال النووى شكلا ماديا متمثلا بالكلمات الجديدة لهذا المجال . فهى عملية افتراضية ذات آثار واقعية جدا !

ازاحة الستار

ومضت فترة من الزمن ، وظهرت بوادر انقلاب تجاه « الرنينات » . وبدأ الحديث يدور عن كون الجسيمات الرنينية ليست اردأ فى الحقيقة من اية جسيمات اخرى .

ولكن ، فى الواقع ، ماذا نقصد بالجسيم ؟ انه تركيب مادى يتمتع بصفات كثيرة تساعد على تمييزه عن الجسيمات الاخرى من حيث الكتلة والشحنة واللف والعمر (زمن البقاء) .

وليس من العبث ان قلنا كلمة ــ العمر . فالبروتون مثلا يكون مستقرا بدرجة مطلقة ، وزمن بقائه كبير الى درجة غير محدودة . اما ميزون ــ باى المشحون فامره يختلف ، اذ يعيش لفترة تعادل اجزاء المليار من الثانية ، بينما يعيش شقيقه المتعادل فترة تقل عن ذلك بمليار مرة . ورغم قصر فترة عمرهما فاننا نسميهما رغم ذلك بالجسيمات !

اما الكتلة ؟ توجد للكيان « الرنينى » كتلة . ويمكن حسابها بعلاقة اينشتين بين الكتلة والطاقة . وبنفس الطريقة يمكن ادخال الشحنة واللف للكيان الرنينى من مجموعة الجسيمات « الملتصقة » للحظة من الزمن ، او نستطيع تحديد هذه الصفات للجسيمات التى تتطاير فى اللحظة التى ينحل فيها الجسيم الرنينى .

وبعبارة اخرى يمكننا ان نعطى « الرنينات » جميع الصفات التى تتميز بها الجسيمات « الحقيقية » . ولا جدال فى ان الجسيمات الجديدة تبدو غير عادية تماما . لكن الفيزيائيين اعتادوا ان يلتقوا بالغرائب لدى كل خطوة يخطوها . ولم يعد يثير استغرابهم اى شىء جديد . وفى الحقيقة يمكن وصف اية مجموعة اما بلغة الصفات المادية واما بلغة صفات المجال . ويتم ذلك بفضل ميكانيكا الكم بالذات .

وفى الحقيقة ان كلا الوصفين متشابهان (متكافئان) . لذلك فان التفسير الجديد ، للوهلة الاولى ، لا يقدم اى شىء جديد . وقد

يختلف الحال اذا ما تسنى استخلاص تنبؤات جديدة ما من المفهوم الجديد حول « الرنينات » ، واذا ما اثبتت التجربة صحتها . وبتعبير آخر سمى « الرنين » باية كلمة تريد ، وصورها كعنقود من الجسيمات المتلاصقة او كجسيم جديد واحد ، وصفه بما يحلو لك من الصفات ، لكن على ان يكون المفهوم الجديد مثمرا ، ويقود الى اكتشافات جديدة .

وقد اكتسب المفهوم الجديد هذا صفات ثمينة كما اظهرت الحياة ذلك خلال فترة قصيرة . وهو المفهوم الذى منح « الرنينات » حق المواطنة فى عالم الجسيمات . وقد بينت دراسة منحنيات الاستطارات لميزونات ــ باى ، ثم ميزونات ــ ك على البروتونات ، بانه قد جرى الحصول على مثل هذه المنحنيات من قبل ايضا ، لدى دراسة استطارات البروتونات نفسها على نوى الذرات .

وقد تحدثنا عن هذه المسألة من قبل . فالنواة التى يطير اليها البروتون تبتلع معه كبيرة من طاقته ، وتصبح فى حالة استثارة . وتستطيع النواة الخروج من هذه الحالة بطرائق مختلفة : فمثلا ، تأخذ بقذف البروتون ومعه كم جاما او اية جسيمات اخرى ، ثم تعود الى حالتها الابتدائية . وعندما تكون طاقة البروتون « كما ينبغى » تماما ، فتظهر على منحنى استطارة البروتونات بواسطة النواة « تلال » وهى تشبه التحدبات التى ذكرناها سابقا .

وهكذا ثبتت فكرة كون « الرنينات » جسيمات فعلا ، ولكنها

جسيمات من نوع خاص . فهى وكأنها حالات استثارة لجسيمات اخرى اكثر استقرارا من جسيمات عالم الاشياء الدقيقة مثل الميزونات والبروتونات والهيبرونات .

وان التنبؤات التى توصلنا اليها فى بداية الستينيات اعتمادا على هذه الفرضية العلمية قد ثبتت خلال فترة قريبة جدا .

الرنينات تكتسب حق المواطنة

وقد لعب هذا المفهوم الجديد دورا كبيرا فى مسألة تصنيف ساكنى عالم الاسياء الدقيقة . وسمح « للرنينات » بتسجيل نفسها مع باقى الجسيمات « الحقيقية » باعتبارها كاملة الحقوق .

اما نواتج انحلالها ؟ وعند بحث هذه المسألة تم اكتشاف صفة هامة للجسيمات الرنينية : اذ انها تستطيع الانحلال فورا بطرق مختلفة عديدة . وقال الفيزيائيون بان لاباس بالامر ، ويمكن « استجواب » الجسيمات المتولدة لدى الانحلال ومعرفة بعض المعلومات حول الجسيمات المكونة لها .

لكن لم يشأ النظريون الانتظار حتى يأتى لهم التجريبيون بالمواد اللازمة جاهزة « على طبق » . فساروا فى طريقهم الى الامام ، وارتكبوا الاخطاء ، وتوغلوا فى الازقة المسدودة ، وتجاوزوا فى كثير من الاحياء دروب غير ممهدة ، وسبقوا فيها فى احيان كثيرة العلماء القائمين بالتجارب .

ولنرجع بذاكرتنا الى اللف النظائرى ، فانه اتاح تصنيف الجسيمات المتقاربة الكتلة باعتبارها اشكال مختلفة لجسيم واحد .

وكان ذلك هو الخطوة الاولى لاحلال النظام فى تسجيل ساكنى عالم الاشياء الدقيقة .

وبقى من الواجب الآن القيام بالخطوة التالية، وهى توحيد هذه المجموعات النظائرية «المضاعفة» الى مجموعات اكبر « فوق المضاعفة». وكانت الصعوبة تكمن فى انه لم تكن واضحة بشكل نهائى بعد « العلاقات العائلية » بين الجسيمات ، كما لم تكن هناك اية معطيات حول عدد الاعضاء الذين يجب ان تتألف منهم كل « عائلة » . وبالمناسبة ، فقد كان واضحا منذ البداية بانه توجد على الاقل ثلاث « عوائل » مختلفة فى الشكل ومتميزة عن بعضها البعض بدرجة كافية ، وهى : الليبتونية والميزونية والباريونية .

ولم يستطيع الفيزيائيون حتى يومنا هذا قول اى شىء حول العوائل الليبتونية . هذا وان مجموعة الليبتونات كلها قليلة العدد بالمقارنة مع مجموعتى الميزونات والباريونات الكثيرة العدد . وبدا ان هذا سيكون سببا لجعل دراستها اكثر سهولة . ولكن رغم ذلك فان الفيزيائيين لم يتمكنوا حتى يومنا هذا من معرفة سبب وجود هذه المجموعة بشكل عام ! هذا وان جميع القوانين المعروفة لعالم الاشياء الدقيقة لا تبرر حتى وجودها .

الا ان الوضع يبعث على الثقة اكثر فى المجموعتين الاخريتين ،

اللتين هما اكبر من تلك بكثير من حيت العدد . ومما لاشك فيه ان كبر تعداد هاتين المجموعتين ، وقد ازداد عدد هما بشدة بعد ادخال « الرنينات » اليها ، لا يجعل مهمة النظريين سهلة .

ومما ساعد في تسهيل عملهم النجاح الموفق في اكتشاف طريقة جديدة في لعبة « الباسيانس » * وظهر ان « الورقات » الجديدة قد جاءت في الوقت المناسب ، اذ ملأت الكثير من الاماكن الشاغرةفي « دستة ورق اللعب » . وقد سميت هذه الطريقة الجديدة في تصنيف الجسيمات باسم غريب جدا وهو « الثمانيات » .

وقد مرت بنا من قبل الواحدات والثنائيات والثلاثيات وهي واحدات وثنائيات وثلاثيات الجسيمات في المجموعات ذات اللف النظائرى صفر ونصف وواحد على التوالي . وسنتحدث عن « الثمانيات » فيما بعد بشكل خاص .

وقد تحدثنا حتى الآن عن تصنيف الجسيمات اعتمادا على بعض د لائلها مثل الكتلة والشحنة الكهربائية واللف الاعتيادى واللف النظائرى . ولم يتم تحقيق هذا التصنيف خلال سنوات ابدا . اذا كان دائما يوجد جسيم يرفض « الجلوس » في المكان المخصص له ، مما أدى انهيار جميع آمال النظريين .

واعلن النظريون في عام ١٩٦١ بان هذه الصفات هي ليست الصفات اللازمة لتصنيف الجسيمات . وكان هذا هو رأى العالم الاميركي

---

* نوع من لعب الورق .

جيل ـ مان مع بعض العلماء الآخرين . وقد اقترحوا رفض جميع الصفات والاقتصار على اللف النظائرى والغرابة .

وعندئذ تتبقى اربعة مقادير فحسب . ولا يعجب القارئ لذلك : فان اللف النظائرى بحد ذاته مقدار معقد ، فهو يتألف من ثلاثة مقادير . ولابد للقارئ من تصديق هذا الرأى اذ يضيق مجال كتابنا فى الواقع عن تفسيره .

وهكذا نجد انه لدى النظريين اربعة مقادير . فما العمل بها ؟ فهل نضيف اليها اربعة مقادير اخرى .

انه اقتراح جرىء جدا . فان العمل مع اربعة مقادير فى آن واحد ليس بالامر السهل ، فما العمل اذا اضيف اليها نفس العدد من المقادير . ولها معنى ـ شبيه بعض الشىء باللف الاعتيادى واللف النظائرى ـ لكنها مع ذلك غامضة جدا . ولم يطلق على الرباعية هذة حتى اى اسم .

ثمانية مقادير ! يبدو ان النظريين قد عرفوا ماذا يعملون . ولم يجر اختيار هذه المقادير صدفة ابدا .

ثلاثيات وثمانيات .....

انها تؤلف مجموعة طريفة جدا ... هذه المقادير الثمانية . ويسميها الفيزيائيون بالمجموعة التوحيدية للتماثل بحجم ٣×٣ . وتكمن خلف هذه الكلمات « الغامضة » صفة اخرى هامة

جدا ، وهى ان المقادير الداخلة فى هذه المجموعة يمكن ان تتحول من احدها الى الآخر ! وبتعبير آخر ، فانه اذا ما ربط كل مقدار فى هذه المجموعة بجسيم معين ، فان جميع الجسيمات يمكن ان تتحول من احدها الى الآخر . ويتبين انها ذات اصل واحد !

وهذا هو بيت القصيد ، وما يرمى اليه كل العمل . وذلك بالتخلى عن الفيزياء ، والاغراق فى الرياضيات المعقدة .

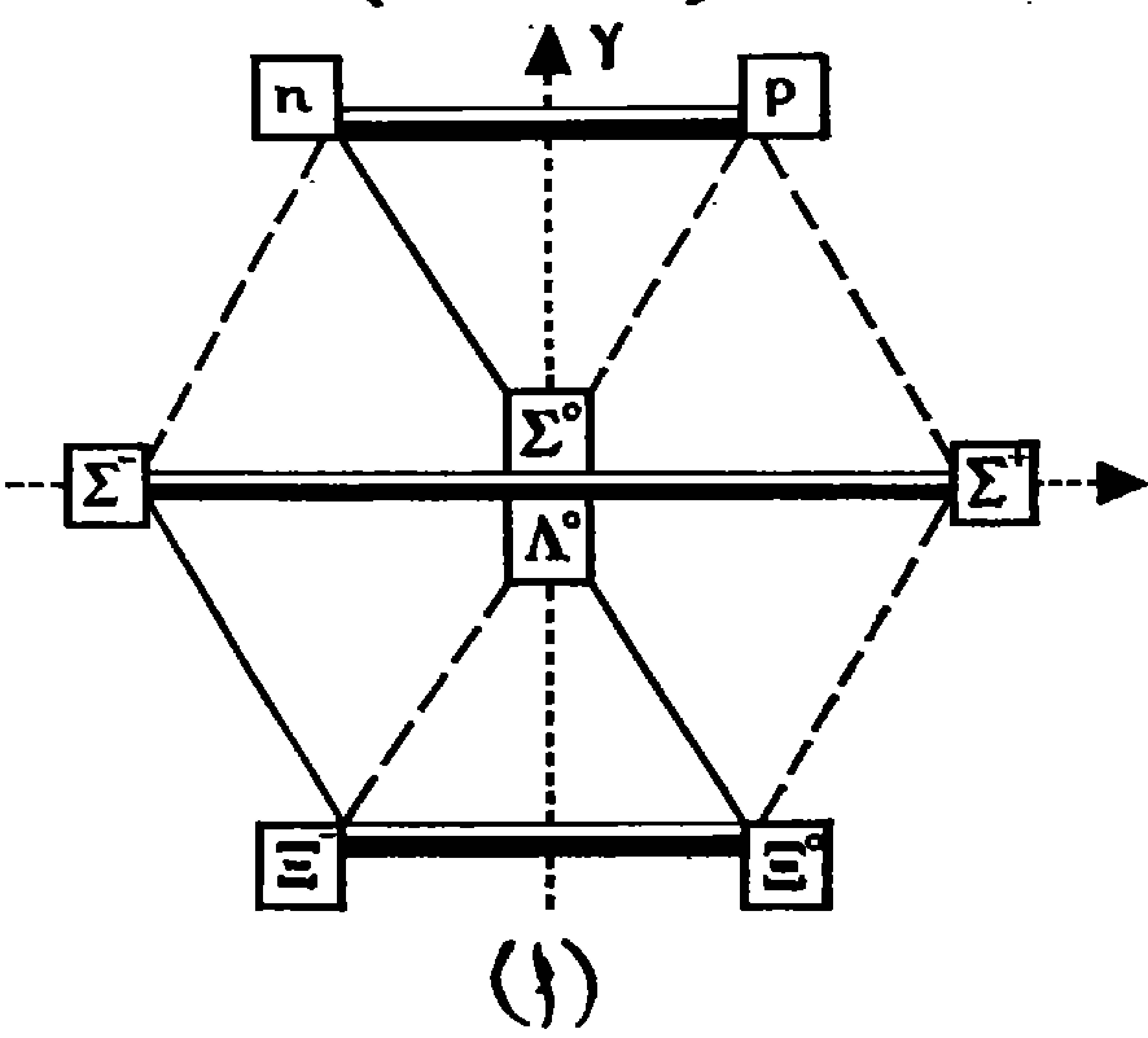
والرياضيون ماهرون فى استخدام مجموعات الارقام . وبضمن ذلك المجموعة المسماة بمجموعة التماثل التوحيدية .

وهكذا توجد فى كل مجموعة ثمانية مقادير اوثمانية جسيمات. فما هى هذه الجسيمات ؟ يمكن تحديد ذلك بشكل قاطع .

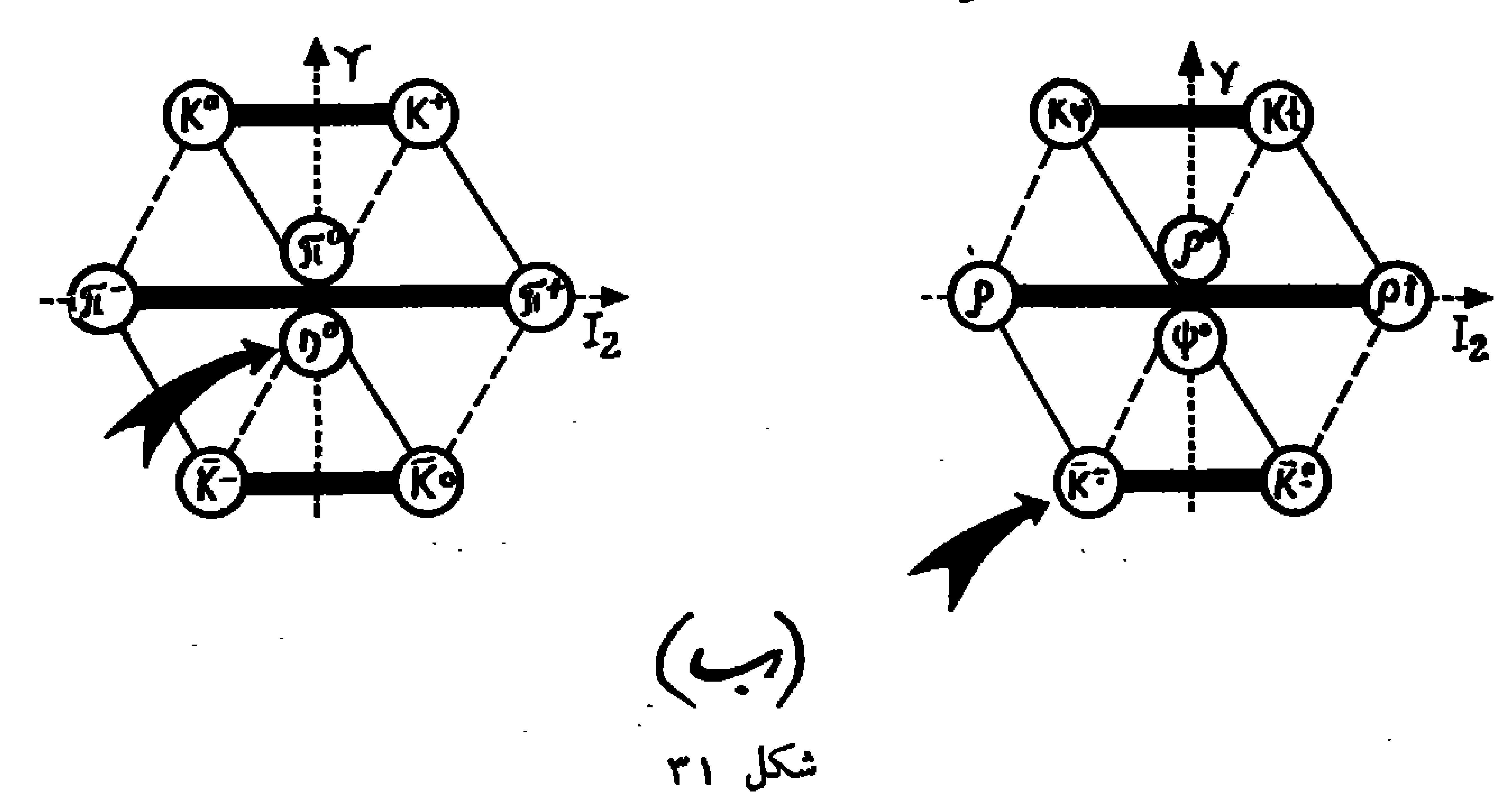
فلنأخذ مجموعة الميزونات مثلا . فحتى زمن قريب لم يكن معروفا منها سوى ثلاثة ميزونات ــ باى واربعة ميزونات ــ ميو ، ويبلغ عددها جميعا سبعة . بينما يجب ان يكون عددها ثمانية ، اذ تتطلب ذلك مجموعة « الثمانيات » للميزونات . ووضعت التكهنات حول صفات الميزون الثامن هذا فان : لفه الاعتيادى يساوى الصفر ، كما هو الحال لدى جميع ميزونات هذه المجموعة ، وهو عديم الشحنة الكهربائية ، ولفه النظائرى يساوى الصفر ايضا طبعا من اجل ان يكون الجسيم وحيدا مفردا ، وكتلته تقارب ١١٠٠ كتلة الكترون .

وفى عام ١٩٦١ نفسه تم العثور على هذا الميزون من قبل

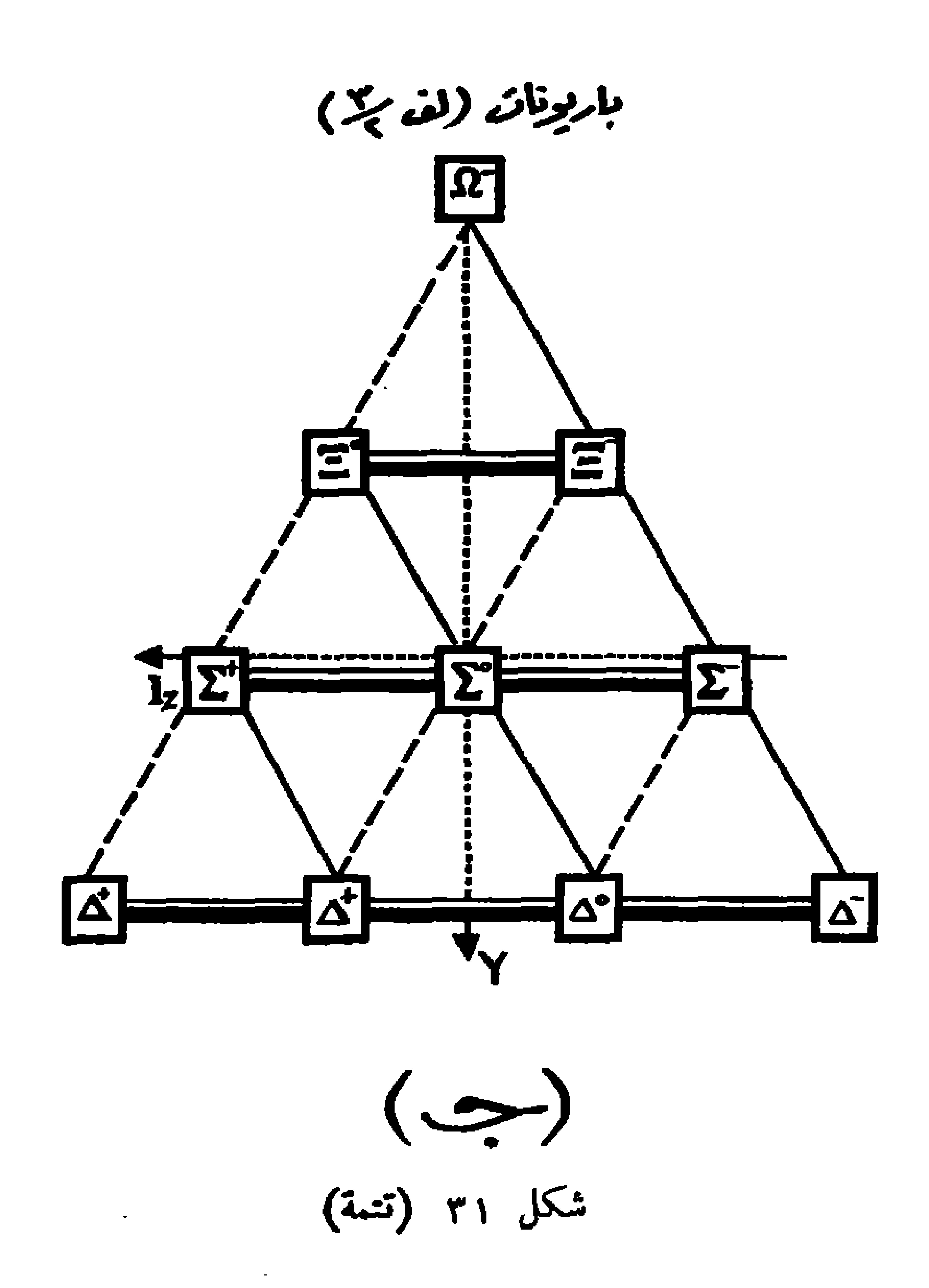
باريونات (لف ½)



ميزونات (تفترض نظريا)



شكل ٣١



(جـ)

شكل ٣١ (تتمة)

الفيزيائيين بعد التكهن بوجوده . وقد ظهر بان كل شيء فيه يقارب ما تكهن به الفيزيائيون النظريون ! فقد قال هؤلاء بان كتلته هي ١١٠٠ ، ولكن اظهرت التجربة بانها تختلف قليلا فهي تساوي ١٠٨٠ كتلة الكترون .

واندفع الفيزيائيون النظريون بعد ذلك سائرين في طريق جديد ،

بعد ان كانوا قد طرحدا فكرتهم الجديدة بشيء من الفتور البالغ .
وخلال السنتين اللاحقتين تم بمساعدة « الرنينات » بناء الثمانية الثانية للميزونات . فدخلت الباريونات المعروفة بذاتها ، وكما يبدو ذلك في الشكل (٣١) ، وبدون اى ضغط فى « الثمانية » العائدة لها .

ثم جاء بعد ذلك دور الهيبرونات « الرنينية » التى تزيد كتلها بثلاثة الآف مرة على كتلة الالكترون . وقد بين النظريون بانه يجب ان تكون فى هذه المجموعة عشرة جسيمات وليست ثمانية ، ولجميعها لف اعتيادى يساوى ٣/٢ . وبالمناسبة فانها اولى الجسيمات ذات اللف الاعتيادى الذى يزيد على الواحد .

وكان المفروض فى هذه المجموعة انها تكون مثلثا يتألف الطابق الاول فيه من اربعة هيبرونات دلتا ، والثانى من ثلاثة هيبرونات $\bar{\Sigma}$ رنينية (وهى اضخم من هيبرونات Σ ، لكنها قريبة منها كما نرى ، لذلك يشار اليها بنفس العلامة ، وقد وضع فوقها خط صغير منعا للخلط) ، اما الطابق الثالث فيتألف من هيبرونين $\bar{\Xi}$ رنينيين ، بينما لا يوجد فيه سقف ! وهكذا يقف بناء الهيبرونات الرنينية دون ان يتم انشاؤه .

وعندما بدأ جيل ــ مان دراسة هذه « العشرة » التفت فورا الى امر غريب . وهو لم يلتفت الى ذلك فحسب ، بل حاول ان يجد صفات « السقف » . وقدر ان لّف « السقف » يجب ان يكون ٣/٢ ، مثل جميع ساكنى هذا البناء العجيب . وبالاضافة الى ذلك

يجب ان تكون شحنته الكهربائية سالبة ، ولفه النظائرى يساوى الصفر كما فى ميزون – ايتا الذى اكتشف من قبل وكتلته تساوى ١٠٨٠ .

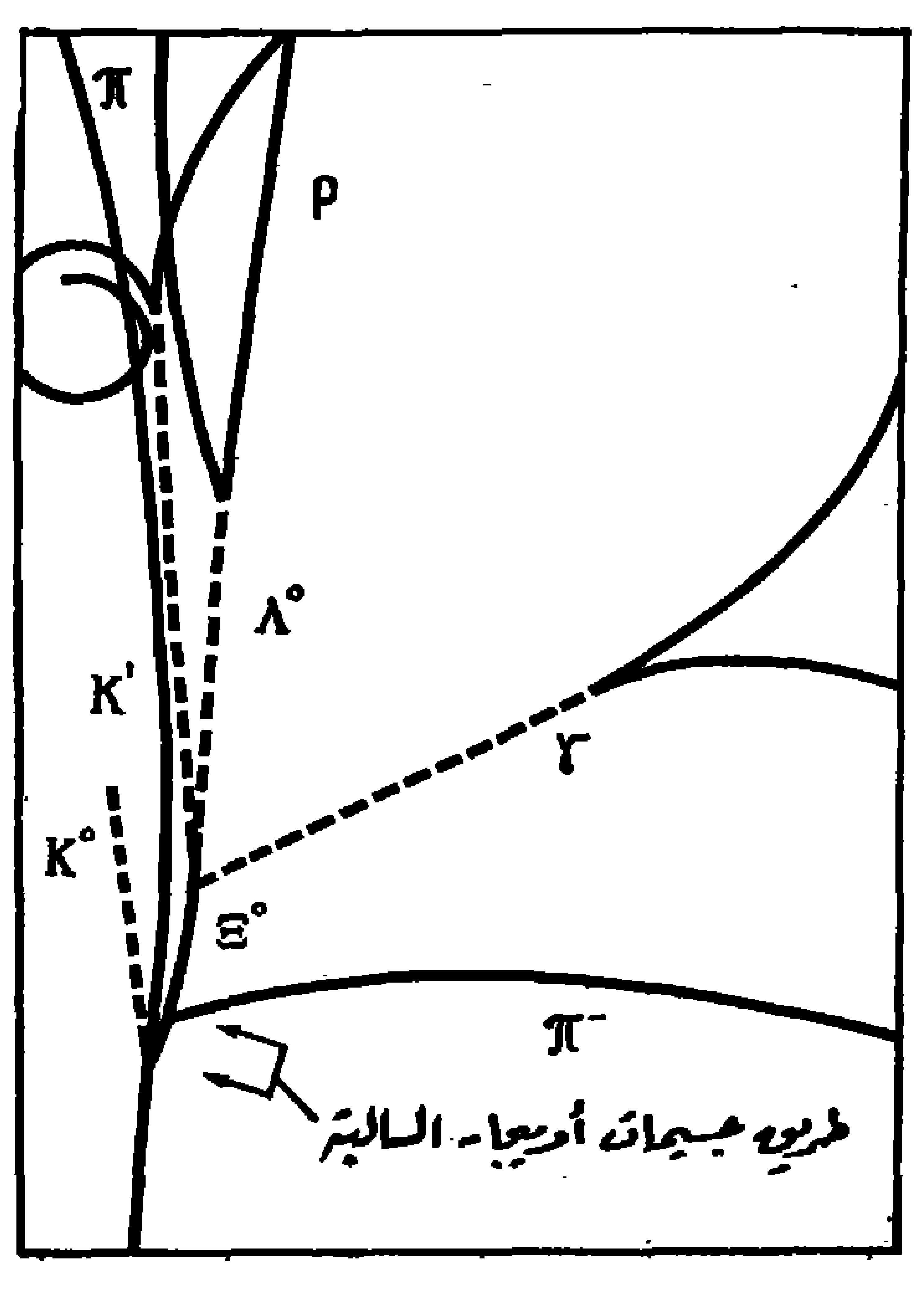
اما كتلة الهيبرون الجديد الذى اطلق عليه جيل – مان اسم اوميجا – ناقص فيجب ان لا تساوى ١٠٨٠ بل حوالى ٣٣٠٠ كتلة الكترون . والاهم من ذلك ان الجسيم الجديد يجب ان لا يكون « رنينيا » بل « حقيقيا » . كما ان فترة بقاءه (العمر) هى نفس الفترة المعتادة لجميع الهيبرونات « الاعتيادية » – وتقارب جزءا من عشرة مليار من الثانية .

وكان هذا يعنى امكانية البحث عن هيبرون – اوميجا . وهو يستطيع خلال فترة وجوده ان يترك اثرا فى مكان ما . ومثال ذلك الغرفة الفقاعية المثبتة بالقرب من محل تكونه .

وقد استمرت تجربة البحث عن هيبرون – اوميجا حوالى سنة كاملة . واخيرا ، تم فى ربيع عام ١٩٦٤ اكتشاف الشئ الفريد الذى طال انتظاره ، بعد دواسة حوالى مائة الف صورة فوتوغرافية التقطت فى الغرفة الفقاعية لمعجل مختبر بروكهافن الوطنى فى الولايات المتحدة الاميركية . فتطلع الى الرسم الذى ننشره هنا ، الذى سيساعدك فى كشف الدرب وسط متاهات الآثار المتولدة على اللوح الفوتوغرافى .

يالها من ورقة آس ...

ان لعبة الورق الجديدة (باستخدام ارقام المجموعات) قد حققت نجاحا كبيرا . والواقع ان اكتشاف هيبرون – اوميجا الذى



شكل ٣٢

جرى التكهن بوجوده سابقا « على طرف سن القلم » يعد عهدا كاملا فى فيزياء الجسيمات .

وقد ظهرت فيه لاول مرة مجموعة من الجسيمات الجديدة ، كما اكتسب تسجيل الجسيمات لاول مرة طابعا منتظما . وكان لابد ان يلعب ذلك دورا لا يقل عما لعبه اكتشاف القانون الدورى للعناصر الذى وضعه منديلييف بالنسبة للكيمياء والفيزياء .

واليوم يلاحظ فى فيزياء الجسيمات الحديثة شيء مشابه . وكانت البداية الاحاديات والثنائيات والثلاثيات للمضاعفات النظائرية . ثم جاءت ثمانيات « فوق المضاعفات » . فماذا سيأتى بعد ذلك ؟

وينبغي عدم ايلاء اية اهمية خاصة لسحر الارقام . واذا ما كان الرقم ثمانية هو مفتاح النظام الدورى للعناصر الكيميائية (ثمانية انواع من التكافؤ) ، فهذا لا يعنى بانه يكتسب نفس « القوة السحرية » فى عالم الجسيمات .

وقد ذكرنا آنفا بان ميكانيكا الكم قد استطاعت تفسير المعنى الكيمياوى للثمانيات . وقد اثبتت ، وهى بالذات بانه لا يمكن ان توجد اكثر من ثمانية الكترونات على القشرة الالكترونية الخارجية للذرة . وهذه الالكترونات هى التى تحدد السلوك الكيميائى للذرات . ولكن ميكانيكا الكم تلاقى فى عالم الجسيمات صعوبات اكبر بكثير . فهنا تسود قوانين مختلفة تماما عما هى فى عالم الذرات . وتضطر ميكانيكا الكم فى هذا العالم، كقاعدة ، الى عدم حل كثير من المشاكل مباشرة ، بل تلجأ الى مناورات جانبية بالنظر لعدم معرفة تلك القوانين الاساسية . ومن هذه المناورات لجوءها الى مجموعات التماثل التوحيدى.

ويستوعب اللف النظائري والتماثل التوحيدى في النتيجة حوالى مائة من الجسيمات المعروفة . ولكن اين البذور التى اعطت هذه الباقة العجيبة من الزهور ؟ وهل توجد بينها جسيمات اساسية، وجسيمات مكوّنة ، ولدت جميع الجسيمات الباقية نتيجة اللعبة المعقدة والدقيقة لتبادلات الفعل القوية والكهرومغناطيسية والضعيفة ؟

وقبل خمسة عشر عاما مضت ادلى الفيزيائى اليابانى ساكاتا (Sakata) برأى مفاده انه توجد مثل هذه الجسيمات المكونة او المولدة للجسيمات الاخرى . وقال بانها : البروتون والنيوترون وهيبرون — لامدا . فقد كانت لاسباب كثيرة تلائم قيامها بدور الجسيمات الاساسية والرئيسية . وبدا ان هذا الرأى واختيار الجسيمات الاصلية قد ثبتا باكتشاف عدم الحفاظ على التماثل وبدراسة تبادلات الفعل الضعيفة .

ولكن « الرياح لا تهب بما تشتهى السفن » اذ تبين بانه يجب ان تتولد من هذه الجسيمات الثلاثة مجموعات مؤلفة من ٦ و ١٥ جسيما . ولا يمكن ابدا العثور على مثل هذه المجموعات بالتجربة .

لذا فقد وضع الفيزيائيون رأى ساكاتا جانبا ، وبالاخص بعد ان طغى عليه فى السنوات اللاحقة ظهور مجموعات مكونة من ثمانية وعشرة جسيمات . لكن التاريخ يعيد نفسه .

ففى الاونة الاخيرة بدأت تشغل اذهان الفيزيائيين من جديد فرضية وجود ثلاثة جسيمات رئيسية، او العمالقة الثلاثة لعالم الاشياء الدقيقة . لكنها ليست نفس الجسيمات التى ذكرها ساكاتا . فلا وجود لهذه الجسيمات وسط الجسيمات المعروفة فى علم الفيزياء .

ويسمى اصحاب الفرضية الجديدة ، وهما جيل — مان وزفايج (Zweig) ، هذه الجسيمات بصورة مختلفة . فاحدهما يدعوها بـ « الكواركات » (quarks) والاخر بـ « الاسات » . وبالها

من مجموعة رائعة من الجسيمات ! وقد تبين بان رقم الغرابة لها يجب ان يكون كسريا . وربما يقول القارئ وما العجب في ذلك ، فان مقدار « الغرابة » هو شيء افتراضي بحت ، ولا تكمن خلفه اية فكرة فيزيائية واضحة .

ولكن مما لا شك فيه ان القارئ سيصاب بالحيرة لدى مجابهته بصفة الشحنة الكهربائية التي يجب ان تكون كذلك بصورة كسر ، وتبلغ ٢/٣ او ١/٣ من شحنة الالكترون . ويجوز الاعتقاد بان القارئ الذي أخذ من الكتب المدرسية ثقة عمياء بحقيقة ان الشحنة الكهربائية هي اصغر شحنة في الكون . فكيف يمكن وجود كسور لهذه الشحنة ؟

وعلى كل حال فلم يعثر احد على « الكواركات » بعد . وربما كان ذلك بسبب افتراض كبر كتلتها كثيرا . ومع ذلك فهي يجب ان تكون اضخم من الالكترون بستة الآف مرة . بينما تكون اثقل الجسيمات « الرنينية » المعروفة ذات كتلة تقارب الـ ٥٠٠٠ كتلة الكترون فقط .

العودة الى الافكار القديمة

ان الارتباط الثابت ، والحاضر بكليته ، بين المادة والمجال قد وضع امام الفيزيائيين مهمة ادراكه ووضع المفاهيم الجديدة حول المادة والمجال اعتمادا على ذلك . وقد بدت ميكانيكا الكم هنا

« محافظة » نوعا ما من حيث مفاهيمها القائمة السابقة والتي شرحناها في هذا الكتاب .

وعندما ظهرت ميكانيكا الكم كانت قد ورثت عن سابقتها — الفيزياء الكلاسيكية — جميع المفاهيم التي استخدمتها الاخيرة في تفسيرها لظواهر عالمنا الاعتيادي ، ثم نقلت هذه المفاهيم الى عالم الاشياء المتناهية في الصغر . وقد وضعت علاقة شرودنجر على اساس تركيب العلاقة الموجية الكلاسيكية ، لكنها وصفت لا الموجات الاعتيادية ، بل « موجات الاحتمال » ، التي تمثل قانون حركة الجسيمات الدقيقة في الفضاء والزمن . وكان الفيزيائيون في اول الامر في غاية الارتياح لذلك : اذ خضعت الجسيمات الدقيقة كليا لقوانين الحركة هذه .

والحق ان ميكانيكا الكم قد لاحظت منذ البداية بان نقل المفاهيم القديمة الى الفيزياء الحديثة ليس من الامور النبيلة . وقد بينت علاقات الريبة بجلاء بان المفاهيم السابقة حول موضع الجسيمات بالضبط ، وكذلك سرعتها وطاقتها والزمن في عالم الاشياء الدقيقة تستخدم في مجال محدود فحسب .

وتحول وضع ما يشبه عدم الارتياح الى عدم رضى تام ، عندما اكتسبت الجسيمات الدقيقة طاقة كافية للبدء بالتحولات المتبادلة . وان الطريقة المذكورة في وضع قوانين حركة الاجسام في الفضاء والزمن قد فقدت قيمتها كليا .

وفى الواقع : كان هناك جسيم واحد تحول الى جسيم او جسيمات مختلفة تماما ، او ظهرت الفوتونات بدلا من الجسيم . ومن الطبيعى ان دالة الموجة ليست فى وضع يسمح لها بوصف هذا التحول نفسه . وكان يجب ان يتم ، اعتمادا على ميكانيكا الكم ، فى نقطة واحدة فى الفضاء وخلال لحظة زمنية قصيرة . وفى النتيجة يتولد جسيم آخر او فوتون تصبح الدالة الموجية السابقة بالنسبة لهما عديمة المفعول .

فما هو موقف ميكانيكا الكم فى هذه الحالة ؟ لقد قامت فى نقطة التحول بتوحيد كلا قانونى الحركة، القديم والجديد، واستخدمت عندئذ قانونى حفظ الطاقة والدفع اللذين تحدثنا عنهما من قبل .

لكن عملية التحول نفسها قد اسقطت من الاعتبار نهائيا عند معالجة المسألة بهذا الشكل ! فاولا ، بما انها تتم فى « نقطة » واحدة من الفضاء وفى « نقطة » واحدة من الزمن ، فان الجسيم فى لحظة التحول لا يتحرك بكل ما فى هذه الكلمة من معنى . وثانيا ، لانه يختفى جسيم من نوع معين ليظهر جسيم من نوع آخر . بينما علاقات الحركة تخصّ جسيما واحدا من نوع لا متغير .

وهذا يعنى بان النظرة الكلاسيكية الاعتيادية التى استخدمت فى ميكانيكا الكم لتفسير الظواهر فى عالم الاشياء المتناهية فى الصغر بمعونة مفهومى الفضاء والزمن ، قد بدت غير كافية بشكل واضح . فهى لم تعكس الجوهر الاساسى لهذا العالم ، الا وهو التحول المتبادل

للاجسام مع بعضها البعض والى مجال كمى ، وكذلك التحول الانعكاسى للكمات الى جسيمات المواد . وظهرت فى جدول الاعمال مسألة شرح سير عملية التحول نفسها . وكان لابد لهذا الغرض من اجراء تغيير جذرى فى طريقة وصفها .

وقد حققت ميكانيكا الكم هذا باستخدام العمليات الافتراضية التى ذكرناها آنفا . ومع ذلك فانها لم تقدم حلا شاملا للمسألة . وتطلب الامر معالجة اكثر عمقا يجرى فيها تغيير التصورات الكلاسيكية حول الفضاء والزمن كما يبدو تغييرا جذريا .

الجانب المعكوس للامور الواضحة

فكيف ينبغى البدء بهذا العمل الضخم الجديد ؟ هل يجرى الاستغناء عن مفهومى الفضاء والزمن نفسيهما ، كما اقترح ذلك بعض العلماء ؟

كلا ، فان ذلك كان سيضع العلماء فى وضع صعب . والسبب ، قبل كل شيء ، يكمن فى ان المفاهيم الموجودة حول عالم الاشياء الدقيقة تعتمد ، رغم كل غرابتها ، على المفاهيم المألوفة حول الفضاء والزمن . ومن الصعب جدا التخلى عن هذه المفاهيم التى يتشبع بها الانسان منذ يوم مولده الاول ، حتى بالنسبة لاكثر العقول تحررا . ومن ناحية اخرى فان وصف الظواهر فى عالم الاشياء الدقيقة

الذى يتم بمعزل عن تحول الجسيمات ، يتطلب مع ذلك ادخال مفهومى الفضاء والزمن ، الملائمين جدا لمثل هذا الوصف .

وهناك طريق آخر اكثر واقعية بكثير : وهو اعادة النظر بتصوراتنا حول الفضاء والزمن . وكان اينشتين اول من قام بذلك قبل نصف قرن مضى . وينبغى الآن اتمام مفهوم اينشتين ، حول العالم الكبير ، من اجل تطبيقه على عالم الاشياء المتناهية فى الصغر .

فمن اى شىء يتألف الجوهر الحقيقى للفضاء والزمن ؟ لقد اعتدنا على هذين المفهومين حتى لم يعودا يثيران اى رغبة فى التفكير بشأنهما . والفراغ حسب المفهوم اليومى لدينا هو مستودع للاجسام . وهل هذا كل ما هناك ؟ فلنفكر للحظة من الزمن من اين ينشأ مفهومنا حول الفضاء . فالانسان منذ مولده يهتدى لا فى الفضاء « المطلق » بل ما بين الاجسام المحيطة به . ويتحسس الاجسام بالنظر .

وتبدو لنا الاشياء اقرب بالنسبة لنا اذا ما شغلت حيزا اكبر من مجال النظر فى عيننا . لكن ذلك لا يتعدى كونه عددا كبيرا من الفوتونات التى يبتعثها الجسم فتتساقط فى عيننا . وبتعبير آخر انه كلما كان المجال الكهرومغناطيسى (الذى يولده الجسم) اقوى ، كلما بدا الشىء اقرب بالنسبة لنا . والعكس بالعكس ، فاذا كان عدد الفوتونات المتساقطة فى اعيننا قليلا فمعناه اما ان الشىء صغير

(اى انه يحتوى على ذرات قليلة تبتعث الفوتونات) ، واما انه بعيد (فلا يبلغ العين سوى عدد قليل من مجموع الفوتونات) .

ولو امتلك الانسان منذ ولادته العينين فقط لما استطاع ابدا التمييز بين الاشياء الصغيرة القريبة والكبيرة البعيدة . فمن المستحيل ، مثلا ، معرفة بعد الاشياء عنا وما هى ابعادها بالاعتماد على العين فقط ، وبدون استخدام العمليات الذهنية الاضافية . وتساعدنا فى ذلك حاسة اللمس . فنحن نلمس الاشياء فنعرف ابعادها (بصورة نسبية طبعا بمقارنتها مع الاشياء الاخرى) .

ولو انعدمت الاشياء لما وجد هناك اى تصور حول الفضاء . لذا فليس من الصدف ان يزول وينعدم الاحساس بوجود الفضاء ليلا عندما لا ترى الاشياء .

ان اعضاء الحس التى نضع على اساس « معطياتها » المفاهيم حول العالم الكبير المحيط بنا هى نفس الاجهزة . وتستطيع بفضل حساسيتها ، تماما ، ان تسجل الاحداث الكمية . لكن العالم مبنى بشكل بحيث تسجل فيه الكثير من مليارات الاحداث المماثلة لهذه فى وقت واحد . وفى النتيجة فان احاسيسنا بشكل عام (وكذلك تصوراتنا) هى « معدل وسط » (او كلاسيكية كما يقول الفيزيائيون) . وتكشف غرابة قوانين الكم فقط لدى دراسة هذه الاحداث كل على انفراد .

ان الفضاء هو ليس الشيء الذى له اصل مادى كما تتصوره اذهاننا . واذا ما حدث ان كنا وسط اشياء لا تتغير ابدا (ويحدث ذلك على الارض داخل حفرة عميقة . كما ان رواد الفضاء سيحلقون فى المستقبل فى مناطق الفضاء البعيدة عن الاجرام السماوية ، وسوف يلاحظون بان صورة السماء لا تتغير خلال سنوات طويلة عندما يحلقون بسرعات غير كبيرة جدا) .

ولقد بينا بانه يوجد ، من حيث المبدأ ، نوعان من الزمن : احدهما الزمن « الذاتى » الذى تحدده العمليات الفيزيائية (والكيميائية) فى الجسم ، والآخر هو الزمن « العام » الذى تحدده مجموعات كبيرة من الاجسام . وفى النتيجة لا يوجد فضاء غير مرتبط بالاجسام ، كما لا يوجد زمن غير مرتبط بالاحداث .

ويتحدد سير الزمن بالاحداث وتعاقب الاسباب والآثار . وكلما كان تطور الاحداث اكثر نشاطا وفعالية ، كلما كان تعاقبها اسرع ، وبتعبير آخر انه كلما كان تبادل الفعل اكثر شدة فى مجموعة ما من الاجسام كلما بدت حركة الزمن فيها « اسرع » .

ولقد شرحنا من قبل بان هذا الاستنتاج قد ثبت بتجربتنا الذاتية . فاليوم الملىء بالاحداث يمر بسرعة ، بينما يمر اليوم الهادىء بطيئا جدا . ويكمن تحت هذا الانطباع الذاتى حول الزمن اساس موضوعى عميق .

الكمات دائما وابدا

لم يعترف جميع الفيزيائيين بعد بالمفاهيم الجديدة حول الفضاء والزمن ، التى نختتم بها حديثنا فى هذا الباب . والادهى من ذلك ان هذه المفاهيم لم تثبت بالتجربة بعد .

وقد برزت قبل حوالى ٣٠ عاما ، لكنها لم تكتسب « حق المواطنة » بعد . غير ان كثيرا من العلماء يعتقدون بانها تتضمن شيئا من الحقيقة .

ان الفكرة الاساسية حول العلاقة بين الفضاء والزمن مع وجود الاجسام وحركتها يمكن ان تبدو فى عالم الاشياء الدقيقة كالآتى : بما ان الجسيمات الدقيقة نفسها وحركتها ذات صفات كمية ، فانه يجب ان يكون الفضاء والزمن كميين ايضا .

واذا ما كان الامر كذلك فيجب ان تنهار البقايا الاخيرة للمفاهيم الكلاسيكية . ويفقد الفضاء والزمن استمراريتها ، ويتجزئان الى « وجبات » منفصلة !

ومعنى ذلك انه يجب وجود « خلايا » خاصة ، اى كمات الفضاء والزمن. وقد تتحدد ابعادها بمقادير الكتل والطاقة وكميات التحرك (وربما بالخصائص الاخرى) للجسيمات الدقيقة . كما ان قيمة هذه الخلايا يجب ان تكون اصغر ما يمكن .

ولكننا لم نعرف حتى الآن مثل هذا « الطول الاولى » و « الفترة

الزمنية الاولية » . وقد يدل هذا على وجودهما خارج نطاق الحس بادق الوسائل الحديثة في قياس الطول والزمن في عالم الاشياء الدقيقة . وحدود هذه الوسائل ، بالنسبة للطول — هي في حدود القوى النووية او ١٠–١٣ سم ، وبالنسبة للزمن — هي في حدود « الزمن النووى » او ١٠–٢٣ ثانية . ويعتقد بعض العلماء بان « طول الكم » ، اذا ما كان له وجود ، يجب ان يكون اقصر بمئات بل وبآلاف المرات .

ويالها من مفاهيم طريفة ! ومفهوم بالنسبة لنا اننا لا نلاحظ ابدا وفي كل مكان وجود كمات الفراغ والزمن . فهي ضئيلة جدا . ولا يستطيع اى كرونومتر قياس الفترات الزمنية بجزء من تريليون التريليون من الثانية . ولا يستطيع اى ميكرومتر قياس الاطوال بجزء من مليار المليار من السنتيمتر !

وحتى اذا ما تسنى لنا تصور القيام بذلك ، اى بان تتوفر لنا الاجهزة القياسية الدقيقة للغاية ، فانه من المستحيل اجراء مثل هذه القياسات . والاجهزة معدات غليظة تؤدى الى تغيير عالم الاشياء الدقيقة لدى محاولة قياسه . ولنتذكر اخيرا بان مفاهيمنا الكلاسيكية حول الطول والزمن تصبح ضيقة في عالم الاشياء الدقيقة ، وتصح في نطاق حدود معينة فقط . وهذه الحدود هي نفسها كمات الفضاء والزمن التي تحدثنا عنها قبل قليل !

اذن فما معنى ادخال كل هذه الخلايا او كمات الزمن ؟ الا تواصل عكس مفاهيمنا اليومية حول الفضاء والزمن ؟

وهذا حق تماما . ولكننا قد أكدنا اكثر من مرة بان كل طبقة جديدة من المعرفة لا تقوم فى الفراغ ، بل على اساس الطبقات السابقة . وان العملية الشاقة للغاية فى استنباط المفاهيم الجديدة لا تتم فى لحظة ، بل بصورة بطيئة جدا ، وتحمل المفاهيم الجديدة دوما آثار اسلافها . ويجرى مولد المفاهيم الجديدة دائما وسط ضجة كبرى .

وهذا ما حدث فى السنوات الاولى لحياة ميكانيكا الكم . وهو يلمس بوضوح اكبر اليوم حيث تلاقى ميكانيكا الكم حواجز اعلى فى طريقها . ولا ندرى فيما اذا كانت ستنتصر ام تهزم ، ام تترك المجال لنظرية اخرى اقوى منها !

من ميكانيكا الكم الى .... ؟

الكتلة ، الشحنة ، اللف ، التماثل ... حاول اعطاء تعريف دقيق لكل من صفات الجسيمات هذه ! على ان يكون تعريفا مستقلا ، لا يعبر فيه عن احد المقادير بدلالة مقدار آخر ، مثلا الكتلة بدلالة قوة الوزن ، والشحنة بدلالة قوة الجذب والتنافر .

ويمكن القول عن ثقة تامة بان نتيجة مثل هذه المحاولة هى الفشل . ونحن كثيرا ما نستخدم هذه المفاهيم ، اما مغزاها « العميق » ، فلا يعرفه احد من الفيزيائيين .

وهذا الوضع صفة مميزة لميكانيكا الكم اليوم . فهى تستخدم على نطاق واسع مفاهيم الكتلة والشحنة وغيرها ، المستعارة من الفيزياء الكلاسيكية . كما فتحت ميكانيكا الكم خصائص جديدة للجسيمات مثل اللف والتماثل . لكنها لا تعرف شيئا عن منشأ هذه الصفات كما هو الحال بالنسبة لمنشأ الكتلة والشحنة .

وفى الواقع ، ما هو معنى الكتلة ؟ هناك جوابان لهذا السؤال .

اولهما : ان الكتلة هى مقياس كمية المادة فى جسم ما . ويمكن اعتبارها ككمية نوى الذرات (ففيها بالذات تتركز عمليا جميع كتلة الذرة) فى الحجم المعطى من المادة . ويمكن اعتبار كتلة النواة بدورها ، بانها كمية الجسيمات النووية (البروتونات والنيوترونات) فيها .

اذن ماذا يقصد فى هذه الحالة بكتلة البروتون نفسه ؟ وهل ان قياس كمية المادة فيه هو كالسابق ؟ واى قياس ؟ واية مادة ؟ ان مفهوم القياس نفسه يعنى امكانية تقسيم شىء ما الى اجزاء صغيرة منه ، ، وأخذها تارة اكبر وتارة اصغر . ولكن يبدو ان البروتون غير قابل للتجزأة مطلقا . وكل ما نستطيع عمله هو مجرد التكهن بنوعية المادة الموجودة فى البروتون .

وعندما نقول بان كتلة البروتون هى حوال ١٠^{-٢٤} جرام ، فهذا لا يعنى سوى ان الجرام الواحد من المادة يحتوى على ١٠ ٢٤ بروتون لا اكثر . ومعنى ذلك ان تعريف الكتلة باعتبارها مقياس المادة للبروتونات ، وغيرها من الجسيمات الاخرى ، قد اصبح عديم المعنى .

اما التعريف الثانى للكتلة فهو : ان الكتلة هى مقياس القصور الذاتى للجسم ، وبتعبير آخر انها مقياس مقاومة الجسم للتغير فى وضعه . وفى الحالة البسيطة فان الكتلة تحدد مقاومة الجسم للتغير فى موضعه فى الفراغ .

اذن ، فلربما نفهم من تعبير كتلة البروتون انه مقياس « عدم

الرغبة » التى يصبح فيها فى حالة الحركة ، تحت تأثير القوى من جانب جسيمات اخرى ؟ لكن هذا التعريف لا يفى بالمرام . فالقوى تمثل تبادل الفعل ، وهى فى النهاية التأثير فى المجال . وعندما يزيد البروتون حركته فانه يكتسب دائما كتلة اضافية من المجال ، وعندما يقلل حركته فانه يمنح هذه الكتلة الى المجال . ومهما كانت هذه الاضافة والنقصان فى الكتلة قليلة ، فانها توجد دائما بصورة مبدئية . وفى النتيجة تكون الكتلة متغيرة دائما ، وهذا يعنى بانها تفقد صفة المقياس المحدد .

وهكذا نجد انه فى عالم الاشياء الدقيقة يجب قياس الكتلة بشىء ما . وتتحدد كتلة البروتون فى مثالنا المذكور وفق معادلات النظرية النسبية ، بكتلة سكون البروتون ونسبة سرعة حركته الى سرعة الضوء .

وهنا يظهر لدينا بصيص من الامل . فان كتلة السكون هى فعلا مقدار ثابت بالنسبة لهذا النوع من الجسيمات . ولا يمكن تغييرها الا بتغيير الجسيم نفسه . فهل ينبع من ذلك بان كتلة السكون هى مقياس للقصور الذاتى ايضا ؟ ولكن لا بالنسبة للحركة الميكانيكية الاعتيادية ــ وهى الازاحة فى الفضاء ، بل بالنسبة الى الحركة بمعناها الواسع جدا ــ وهو تحول الجسيم ؟

ان هذا يبدو قريبا من الواقع . ونحن نتذكر بانه عندما جرت مقارنة الطاقة الحركية للجسيمات مع طاقتها الحقيقية ، التى تحددها

كتلة السكون بالذات ، حصلت الجسيمات على امكانية التحول الواقعي الى كمات مجالها .

واذا ما كان الامر كذلك فان كتلة السكون تبدو كمقياس للاستقرار النوعي للجسيمات . وتكون هذه الكتلة غير كبيرة جدا لدى بعض الجسيمات وقد تحدث التحولات الى كمات في مقادير غير عالية جدا من الطاقة . بينما نجدها لدى البعض الآخر من الجسيمات اكبر بكثير ، وبالتالي فان الجسيمات اكثر استقرارا بدرجة كبيرة .

ولنتذكر بانه قد تحدث ، اعتمادا على المفاهيم الحديثة حول الجسيم ، تحولات افتراضية بالاضافة الى التحولات الحقيقية . وتكمن التحولات الافتراضية في اساس تبادلات الفعل فيها . وبذلك فان الكتلة تكتسب مظهرا آخر ، في تحديد طاقة الكمات الافتراضية للمجا لات .

وفي النتيجة، وكما نرى، فان جوهر الكتلة هو شيء في غاية التعقيد كما يبدو . فمن ناحية ان الكتلة هي صفة خاصة قائمة بذاتها للجسيم ، ومن ناحية اخرى ان الكتلة تدخل كعامل محدد في جميع اشكال تبادل الفعل لهذا الجسيم .

ومما لا شك فيه ان الصفات المميزة الاخرى للجسيمات يجب ان تكون بنفس التعقيد من حيث الجوهر ايضا . وان جميع المسائل المتعلقة بتفسير جوهر الاشياء العميق هذا في عالم الاشياء الدقيقة ، تسير اليوم الى القمة الشاهقة التي لم تبلغها الفيزياء بعد . وهذه القمة

هى العلاقة المتبادلة بين الشكلين الاساسيين لمادة الوجود وهما المادة والمجال .

ان جسيمات المادة تمتلك صفات المجال . بينما تمتلك كمات المجال صفات المادة ...

فاى منهما « اكثر اساسية » ، ان جاز القول ، والاولى : هل هى المادة ام المجال ؟.

وقد كان الجواب على هذا السؤال يبدو واضحا قبل مائة عام ، عندما كان مفهوم المجال حديث العهد فى علم الفيزياء ، وهو : المادة طبعا ! فتكون الجسيمات حول نفسها المجالات . والمجال الاكثر من اداة مساعدة للقيام بتبادلات الفعل للجسيمات . ولا وجود للمجالات بدون المادة .

ومضى الوقت ، ثم اتضح بان المجال يستطيع توليد الجسيمات ، وان الجسيمات يمكن ان تختفى وتتحول الى مجال . فاية اداة مساعدة هو اذن !

وعندئذ اندفع الفيزيائيون نحو الطرف الآخر . فاعلنوا فى اعقاب اينشتين : بان المجال اولى ، وهو المجال الواحد الشامل فى كافة اشكاله التى يظهر فيها . وان جسيمات المادة ليست اكثر من « مركزات » المجال ! فبدون مجال لا توجد مادة .

وامضى اينشتين سنوات عديدة فى العمل من اجل نظرية المجال الواحد ، الذى يضم جميع الاشكال المعروفة للمجالات والجسيمات .

غير ان جميع محاولات وضع مثل هذه النظرية قد باءت بالفشل الواحدة بعد الاخرى . وعندئذ بدأ الفيزيائيون يميلون تدريجيا الى قبول فكرة انه لا يجوز منح جائزة التفوق لا الى المجال ولا الى المادة . فكلاهما يعتبران ، على قدم المساواة ، الجانبين الاولين والاساسيين لمادة الوجود .

ان هذا الاستنتاج صحيح ، وكان المفروض ان تخف حدة الجدل بين انصار المجال الواحد والمادة الواحدة . ولكن الفيزيائيين لا زالوا حتى يومنا هذا يتجادلون حول مدى صحة ادراكهم لعالم الاشياء المتناهية فى الصغر ، وفيما اذا كانت المفاهيم التى وضعوها تطابق الجوهر الحقيقى لهذه الاشياء . وفيما اذا كانوا قد ارتكبوا خطأ فى محاولتهم فرض نظرية اوجدها عقل الانسان على الطبيعة ؟ وهل ان الانسان ــ باعتباره يمثل عالم الاشياء الكبيرة ــ قادر على ادراك الاشياء والاحداث فى عالم الذرات والنوى والجسيمات الاولية الصغير جدا .

ان الانسان قادر على ادراك قوانين الطبيعة ، ويقترب من الحقيقة شيئا فشيئا .

لكن ادراكه سوف لا ينتهى ابدا ، وسوف لن تكون معرفته بالعالم دقيقة بشكل مطلق ابدا .

وقد اتخذت الفيزياء هذه الفرضيات اساسا لها ، وبدأت فى حل

مسألة كيفية فهم العلاقات المتبادلة بين الشكلين الاساسيين لمادة الوجود .

وقبل كل شيء هل بالامكان وجود مجال واحد او مادة واحدة ؟ كلا . ان المجال والمادة هما شكلان متناقضان لوجود مادة الوجود وتطورها . ولا يمكن وجود احدهما بدون الآخر . وهما وجهان لعملة نقدية واحدة . وهما متحدان سوية مع تناقضاتهما ، ويرتبطان برباط لا ينفصم : فالمجال يمتلك صفات المادة ، والمادة صفات المجال .

فهل تمتلك ، بعد ذلك ، مفاهيمنا حول وجود هذين الشكلين لمادة الوجود والعلاقة بينهما اى درجة من الواقع ؟ نعم ، لان هذه المفاهيم ، رغم عدم كونها مضبوطة ، هى صحيحة بصورة اساسية . وكقاعدة ، فان الظواهر التى جرت مراقبتها تدخل فى نطاق هذه المفاهيم ، كما وتلاحظ فى الواقع الظواهر التى جرى التنبؤ بها اعتمادا على هذه المفاهيم ايضا .

فلماذا اذن يثور النقاش بين الفيزيائيين حول تفسير النتائج التى حصلوا عليها ؟ قبل كل شيء لانه ليس جميع الفيزيائيين مطلعين على المادية الديالكتيكية . فالفلسفات المعادية ، وبالاخص اكثر تياراتها سموما ، ويدعى بالمثالية الذاتية ، تؤكد على ان العالم لا يوجد الا فى تصورات الانسان ، وان قوانين الطبيعة الموضوعة ما هى الاثمرة من ثمار لعب العقل الانسانى . لذلك فبالاعتماد على هذه

الفلسفة نجد انه حتى بعض كبار العلماء لا يميل الى ايلاء الاكتشافات الفيزيائية اهمية واقعية . ويفضل هؤلاء العلماء اعتبار العالم كشيء عسير على الفهم والادراك .

وقد غدا وقوع المرء فى هذا الخطأ سهلا جدا لانه لا تجوز مراقبة عالم الاشياء المتناهية فى الصغر بصورة مباشرة ، ولا يمكن التأكد من وجوده « بأم عينيه » . والاهم من ذلك ان صفات عالم الاشياء الدقيقة تختلف بشكل حادّ عن صفات العالم المألوف بالنسبة لنا . وان درجة هذا الاختلاف كبيرة الى حد ان مفاهيمنا اليومية لا تعكس الجوهر الحقيقى لعالم الاشياء الدقيقة .

ويتطور العالم بشكل يجعل المفاهيم الجديدة فيه تولد بصورة بطيئة جدا . والانسان يعيش مع ذلك فى عالم الاشياء الاعتيادية ، والمفاهيم المعتادة ، كما ان عقله اعتاد على هذه المفاهيم بالذات . ومن الصعب جدا الهائه عنها وجذبه الى مفاهيم « مبهمة » ولو تستجيب بشكل صحيح لحقيقة عالم الاشياء الدقيقة . غير ان ذلك ضرورى : فمن غير الملائم جدا الحديث والتفكير فى « الجسيم الدقيق » وانت تعرف بانه ليس جسيما فقط ، والحديث عن « المجال » وانت تعرف بانه ليس مجالا فقط . والمسألة هنا لا تتعلق بالكلمات فحسب بقدر تعلقها بالمعانى المرتبطة بها ، والتى تدعى بالمفاهيم .

وقد نجحت ميكانيكا الكم حتى الآن فى توحيد المفاهيم القديمة مع نماذج الجسيمات — الموجات والثقب — البوزترون والكم —

الميزون . لكن هذه المعانى المزدوجة لم تتوحد فى عقول الفيزيائيين بعد فى واقع واحد .

والمستقبل القريب كفيل بتحقيق ذلك .

ترجمة حياة ميكانيكا الكم

مرت ميكانيكا الكم خلال ٦٠ عاما من وجودها بثلاث مراحل فى تطورها .

ويمكن تسمية المرحلة الاولى كالآتى : من بلانك الى دى برويل . وهى تشمل ٢٥ عاما ، تبتدئ من اكتشاف الصفات المادية للموجات الضوئية وتنتهى باكتشاف الصفات الموجية لجسيمات المادة . وخلال هذه السنوات وضع اينشتين وبوهر نظرية الجسيمات الضوئية (الفوتونات) ، واول نظرية — غير متكاملة جدا بعد — حول بناء الذرات والظواهر الجارية فيها .

وتبدأ المرحلة الثانية فى تطور ميكانيكا الكم باكتشاف دى برويل عام ١٩٢٤ . وتم خلال مرحلة قصيرة جدا — لا تتجاوز الخمس سنوات — تكوين «الوسيلة العاملة» الاساسية للنظرية الجديدة . فقام ديراك باول تركيب فى تاريخ ميكانيكا الكم بين هذه النظرية والنظرية النسبية لاينشتين . وجرى فى السنوات اللاحقة والتى سبقت قيام الحرب العالمية الثانية وضع نظرية نواة الذرة .

ثم حلت اخيرا المرحلة الثالثة ، وبصورة اساسية فى السنوات

التى اعقبت الحرب العالمية الثانية ، وهى : اتساع ميكانيكا الكم لتشمل الجسيمات الاولية للمادة والشكل الاساسى الثانى لمادة الكون . وهو المجال .

وفى المرحلة الاخيرة ازدادت كثيرا الصعوبات التى وجب على ميكانيكا الكم اجتيازها . وأخذت لاول مرة تتذوق مرارة الخيبة بعد الانتصارات الباهرة .

وتولد انطباع بان اسنانها الحادة القادرة على كسر الجوزات الصلبة مثل الذرات والجزيئات ، بدت مثلومة وعاجزة امام جوزات صلدة حقا مثل تركيب الجسيمات الاولية نفسها وتبادل الفعل فيما بينها .

وتقدمت التجربة العملية بمراحل كثيرة على النظرية فى هذا المجال . وبقيت اهم العمليات الجارية فى اعماق نوى الذرات تنتظر تفسيرا نظريا لها . وطرحت فى جدول الاعمال قضايا جوهر مفهوم الجسيمات الاولية نفسه .

ولا زالت ميكانيكية الكم عاجزة عن حل هذه القضايا . ويتجلى شيئا فشيئا كونها ضيقة الحدود ، وهى نفس الحدود التى بدت قبل عشرين عاما غامضة وبعيدة جدا . وحان الحين « لتصحيح » ميكانيكا الكم .

الا يذكرنا هذا الوضع بما كانت عليه سليفتها – الميكانيكا الكلاسيكية – فى نهاية القرن الماضى ؟

وبدا من ناحية بانه ليست هناك بعد حقائق تناقض المبادئ الاساسية لميكانيكا الكم . ونقتصر الحديث الآن فقط على كونها غير قادرة على تفسير عدد من الظواهر ، وعدم قدرة النظرية نفسها لا العلماء . ولربما يتطلب ذلك توسيع نطاقها نوعا ما ، وتطعيمها بقوى جديدة ، وادخال افكار هامة جديدة فى ميكانيكا الكم لا تناقضها فى روح مبادئها .

ولكن قد يحدث ان هذه الافكار لا تنسجم مع سابقتها . فلن نجد من مخرج سوى الاخلاد للحزن فترة الزمن .

ليست هناك ، ولم توجد ولن يكون وجود ، لنظريات قوية الى ما لا حدّ له . كما ان حياة كل نظرية علمية هى مثل حياة الانسان تعرف مرحلة الطفولة الغضة عندما تبدأ الاسنان بالظهور . وكذلك مرحلة الفتوة القوية عندما تستطيع بسهولة فائقة حل اصعب المسائل التى بقيت غامضة خلال قرون طوال . كما تعرف مرحلة النضوج الوادعة عندما تصبح حركتها فى العمق بطيئة ، وتتوسع النظرية وتمتد ، فتشمل مجالات واسعة من الظواهر ، وتقتحم التكنيك والصناعة ، وتقيم علاقات مع العلوم الاخرى . ثم تعرف اخيرا مرحلة الشيخوخة حيث تصبح عاجزة امام اكتساح الحقائق الجديدة التى جرى اكتشافها بموجب النظرية نفسها ، لكنها لا تستطيع تفسيرها .

وعندئذ تحلّ مرحلة من الركود فى هذا المجال من العلم

غير ان الواقع ليس بهذا الشكل . اذ تنضج في هدوء الحجرات والمختبرات افكار جديدة ضاق بها نطاق النظرية القديمة . وبدون سابق انذار تقوم هذه الافكار في يوم رائع حقا بنسف البيت الذي ولدت فيه . وعندئذ يقوم العلم بقفزة الى الامام !

وموقع ميكانيكا الكم في تقسيم المراحل المذكورة اليوم هو في قمة مرحلة النضوج وبداية الشيخوخة . وترتبط الكثير من الانجازات التكنيكية الضخمة بها . كما ان دائرة القضايا التي تشملها واسعة جدا — من تركيب الكواكب الضخمة الى بنية النوى المتناهية في الصغر والجسيمات الاولية . وليست هناك من نظرية في فيزياء عالم الاشياء الدقيقة اقوى من ميكانيكا الكم .

لا توجد مثل تلك النظرية ، لكن الحاجة اليها ماسّة جدا . ويحاول العلماء — وعددهم في حقل الفيزياء كبير اليوم — اما بعث روح الفتوة في ميكانيكا الكم ، باكسابها محتوى جديدا ، لا يناقض مبادئها الاساسية ، واما انهم يريدون تغيير روحها نفسها ، وهم يبحثون عن طرق اكثر جذرية ويبدون استعدادهم حتى للتضحية بها . لكن لا يستطيع احد منهم بعد التباهي بتحقيق اي نجاح هام .

ويزداد عدد الفيزيائيين الذين يميلون الى الاعتقاد بان الكلمة ستكون لنظرية جديدة ، غريبة اكثر ، نظرية « مجنونة » . ولا يخاف العلماء من هذه الكلمة . فان اية نظرية كبيرة وجديدة من

حيث المبدأ تلقى معارضة من سابقتها لدى نشوئها ، وهناك دوما اناس يوصون بعرض صاحب النظرية الجديدة على طبيب نفسانى . وحتى ميكانيكا الكم نفسها كانت تعتبر من قبل كثير من الفيزيائيين نظرية « مجنونة » . اما اليوم فلا يوجد ولا عالم واحد يعتبرها غير صحيحة .

ومهما كان الامر فهناك حقيقة واحدة وهى ان الفيزياء تقف اليوم على عتبة قفزة جديدة . لكنها ليست قفزة فى المجهول . فان العلماء يرون جيدا الطريق الذى يسيرون فيه سفينة الفيزياء الحديثة ، ويعرفون محطات وقوفها القريبة .

واليكم بعض هذه المحطات : التنظيم المنهجى الموحد والصارم لكافة الجسيمات المكتشفة حتى الوقت الحاضر ، وربما فى المستقبل ايضا . تركيب جسيمات المادة فى الكون وصفاتها الداخلية . طبيعة القوى المؤثرة فى نوى الذرات . القوانين الدقيقة للعلاقات المتبادلة بين الشكلين الاساسيين لمادة الكون وهى : المادة والمجال . الرابطة المتبادلة وتوقف جميع صفات المادة المتحركة على بعضها البعض ، وهى : الطاقة والزمن ، والكتلة والفضاء ، والمغزى الخاص لعالم الاشياء الدقيقة الذى تحدده هذه الرابطة .

وقد تحدثنا فى هذا الكتاب عن كيفية نشوء وتطور ميكانيكا الكم ، وكيف اصبحت ذلك العلم الجبار الذى نراه اليوم . كما تحدثنا عن كيفية تجاوز ميكانيكا الكم للمصاعب الحديثة فى التطورها ، وكيف انها تبحث عن باب يؤدى بها الى عالم الاشياء

الدقيقة جدا ، الذى قد يجوز لنا تسميته بعالم الاشياء فوق الدقيقة.
ان ادراك وغزو عوالم الاشياء الدقيقة الى اقصى حد هو الدرب الاساسى الذى يسير فيه العلم والتكنيك .

الحياة الثانية لميكانيكا الكم

لكل علم حياتان . الاولى تتعلق با لافكار والمفاهيم والقوانين والمعادلات . والثانية تتعلق بالتطبيق التكنيكى للعلم ، وتتمثل فى الاجهزة والمعدات والمكنات الذكية والقوية .

ومهما جال فكر العلماء بعيدا فى الآفاق المجردة ، فانه يقف امامهم دائما ، بصورة مرئية او غير مرئية ، هدف العودة الى عالم الواقع الذى يحيوه ، والى متطلبات هذا العالم الضرورية .

ففى كل كشف جديد لا يزداد حجم المعارف البشرية فحسب . بل وتزداد بذلك قوة البشر فى صراعهم مع الطبيعة . ويمكن ملاحظة انه ينقص من قرن لآخر الزمن الذى يفصل بين تاريخ الاكتشاف العلمى الضخم وبين تاريخ استخدامه عمليا .

وان العلم يحدس دوما المشاكل التى ستجابه البشرية فيما بعد نتيجة لذلك . ان ذلك شيء موضوعى وحتمى ترتكز على اساسه قوانين تطور المجتمع .

كما ان العلم لا ينتظر نضوج مشكلة حيوية وهامة ما . وسواء

ادرك العلماء ذلك ام لا ، فانهم يقتحمون المشاكل الجديدة قبل وقت طويل من اكتسابها الحيوية والاهمية .

والعلم هو مجموعة «الحراسة المتقدمة» للمجتمع الانسانى . وهو الذى يستكشف المستقبل ، ويحمى الحاضر .

ويعتبر اكتشاف ودراسة ميكانيكا الكم تعبيرا وتصويرا طيبا للكلمات التى وردت اعلاه . ونحن نكرس القسم الختامى من كتابنا للحياة الثانية لميكانيكا الكم .

برز المفهوم حول وجود نوى الذرات فى عام ١٩١٢ تقريبا . وبعد مضى عشرين سنة اكتسب هذا المفهوم سمات ثابتة وصحيحة : فاتضح من اية جسيمات تتألف النواة ، وتكشفت غرابة القوى التى تؤثر بين الجسيمات النووية . ولكن «صعوبة بلوغ» نوى الذرات — من حيث كشفها وفهمها — لا تقف حجر عثرة فى طريق الفيزيائيين . فبعد مرور ١٣ عاما بدأ فجر العصر الذرى . ولو كان ، فى الحقيقة ، بشكل القنبلتين الذريتين البغيضتين اللتين فجرهما الاميركان فوق هيروشيما وناجازاكى ! وبدا كأنه يحمل للبشرية لا الخير بل الموت والهلاك الجماعى للبشرية . ولكن لم تمر سوى اعوام قليلة اذ بدأ فى الاتحاد السوفييتى فى عام ١٩٥٤ تشغيل اول محطة ذرية لتوليد الكهرباء فى العالم .

لقد اصبحت الذرة فى قبضة الايادى المحبة للسلام ! وهى قادرة على القيام بالاعاجيب فى هذه الايادى . ووجه علماؤنا قوة

الذرة ، التى كانت سابقا فى خدمة الحرب والدمار ، لخدمة السلام والابداع .

ووجدت ميكانيكا الكم اول استخدام تكنيكى رائع لها فى اتون المفاعل الذرى ، الذى تنطلق فيه سيول النيوترونات ، فتشطر الذرات الثقيلة ، وتولد الحرارة والتيار الكهربائى .

ثم بدأ العلماء بعد ذلك محاولات استخلاص الطاقة من النوى الخفيفة ، وفى الدرجة الاولى ، نوى نظائر الايدروجين . وقد وضع الاتحاد السوفييتى امامه هدفا انسانيا هو استخدام التفاعلات النووية الحرارية فى الطاقة السلمية .

وتقوم ميكانيكا الكم بدور هام فى هذا العمل . فهى بالذات قد مهدت الطريق لتحقيق التفاعلات النووية الحرارية ، واتاحت امكانية التنبؤ بفائدتها العظيمة فى توليد الطاقة .

وماذا بعد ؟ ستبرز بعد ذلك مشاكل جديدة . وستكون هذه المشاكل اصعب بما لا يقاس بالنسبة للمشاكل التى تواجه العلماء اليوم . لكن علماء المستقبل سيكونون اكثر معرفة وكفاءة من علماء هذا اليوم !

وحتى وقت قريب كان العلماء فى كثير من الاحيان لا يولون اهتماما كبيرا لما يمكن ان تقود اليه اكتشافاتهم . فان العالم الشاب يوفيه الذى اهتم فى مطلع قرننا بدراسة المواد التالفة « العادم » —

وقد اعتبرت كذلك فى تلك الايام — لم يتصور الاهمية التى ستكتسبها اشباه الموصلات فى التكنيك .

ولكن اشباه الموصلات كانت ستغدو عديمة القيمة بدون ميكانيكا الكم . فهى لم تفسر صفاتها العجيبة فحسب ، بل اقترحت سبل اجراء تحسينات جذرية عليها . واليوم اصبح ذلك القسم من ميكانيكا الكم ، الذى يسمى بمنطقة نظرية الاجسام الجاسئة والذى تحدثنا عنه اعلاه ، نجمة هادية لآلاف العلماء والمهندسين العاملين فى حقل الالكترونيات .

وقد احدثت الاجهزة الالكترونية الصغيرة والقوية جدا تغييرات جذرية فى الصناعة والتكنيك . ولا يستغنى اليوم عنها اى مصنع او مجال من مجالات النقل والاتصالات . ومن الصعوبة بمكان ذكر اى حقل للنشاط الانسانى لم تجرب فيه تأثيرات الالكترونيات .

ويعمل العلماء بجد فى حلّ مسألة فى غاية الجرأة : وهى الاستغناء بواسطة اشباه الموصلات عن التبعية لمصادر الطاقة « المستخرجة » ، واستخلاصها من اشعة الشمس مباشرة ، التى تتساقط بسخاء على كوكبنا . ويجرى صنع بطاريات اشباه الموصلات الاولى التى تحول ضوء الشمس الى طاقة كهربائية . وقد وضعت المشاريع لاقامة مثل هذه البطاريات على سطح القمر ، وحتى على سطح الكواكب الاخرى من المجموعة الشمسية .

والمشروع الاخير فى غاية الاهمية . فان تكوين مساحة هائلة

من الارض مغطاة باشباه الموصلات الضرورية من اجل اصطياد اكبر جزء من اشعة الشمس القادمة الى الارض ، قد يؤدى الى التوغل فى حقلى النبات والحيوان سواء ما يوجد منها حاليا او ما قد يفيد فى المستقبل . ومن الطبيعي فان هذه المشكلة تنعدم على سطح القمر .

اذن فكيف ننقل الطاقة المستحصلة بهذا الشكل الى الارض ؟ فلا يمكن مد خطوط نقل الطاقة فى الفضاء الكونى . كما ان مثل هذه الخطوط تولد فى المدى « الارضى » الصغير فقدا كبيرا فى الطاقة ، مما يجعلها لا تعتبر حلا مثاليا للمشكلة .

وقد اقترح العالم الفيزيائى السوفييتى البارز فابريكانت قبل حوالى عشرين سنة فكرة المضخم الكمى للموجات الكهرومغناطيسية . وبعثت ميكانيكا الكم التى تمثلت اول الامر فى فكرة المضخم الكمى ثم المولد الكمى ، قد بعثت الى الوجود الكثير من الاجهزة .

فما هى هذه الاجهزة ؟ ان اسمائها معروفة لدينا اليوم وهى : المازرات (masers) ـ مضخمات ومولدات الموجات اللاسلكية ، واللازرات (lasers) ـ مضخمات ومولدات الضوء . وان ما اعتبرناه ضربا من الخيال العلمى قد اصبح حقيقة واقعة .

هذا وقد منحت جائزة نوبل الى العالمين السوفييتيين ن . باسوف وأ . بروخوروف وكذلك العالم الاميركى تاونس وذلك تقديرا لجهودهم فى صنع المولدات الكمية .

وقد تحدثنا فى بداية الكتاب عن قوانين ميكانيكا الكم التى تتحكم في الاشعاع الكهرومغناطيسى فى الذرات . وجرى اثبات هذه القوانين منذ زمن طويل وبشكل قاطع . ونقول منذ زمن طويل (لانه جرى قبل ٥٠ عاما ، وهو زمن طويل جدا بالنسبة لتاريخ ميكانيكا الكم) ، وبشكل قاطع الى درجة انه فى عام ١٩٥٠ لم يعد من احد يفكر فيها الا بعض الافراد القلائل .

ولكن حدث ان القى عليها باحث اريب ومتفحص للامور نظرة جديدة ومن زاوية اخرى . وعندها بدت هذه القوانين بشكل لامع جديد ، وجرى بموجبها صنع اجهزة مذهلة من حيث القوة .

ولم تسنح لنا الفرصة للحديث هنا سوى عن بعض الانجازات الفنية الممثلة لتلك الافكار و المفاهيم حول عالم الاشياء المتناهية فى الصغر التى جاءت بها ميكانيكا الكم . وعددها اليوم كبير جدا . وتدخل ميكانيكا الكم يوما بعد يوم بشكل اكثر اتساعا فى التكنيك والصناعة . فان الحياة الثانية لميكانيكا الكم غنية ومتعددة الاشكال الى حد عجيب .

ونحن نشهد اليوم بداية هذه الحياة . وسيرى احفادنا الاقربون انجازاتها التى تفوق جميع تنبؤات اكثر الناس الخياليين جرأة فى التصور فى ايامنا هذه .

المحتويات

من الميكانيكا الكلاسيكية الى ميكانيكا الكم

الخطوات الاولى للنظرية الجديدة

من نظرية بوهر ... الى ميكانيكا الكم

الذرات والجزيئات والبلورات

فى أعماق نواة الذرة

من عالم النوى الذرية الى عالم الجسيمات الاولية

من ميكانيكا الكم الى .... ؟

الى القراء الاعزاء ،

يسر دار «مير» للطباعة والنشر ان تكتبوا اليها عن رأيكم فى هذا الكتاب ، حول مضمونه وترجمته ، اسلوبه وشكل عرضه ، وتكون شاكرة لكم لو ابديتم لها ملاحظاتكم وانطباعاتكم . ويسر الدار كذلك ان تعلموها بما ترغبون الاطلاع عليه من الكتب العلمية والتكنيكية السوفييتية التى تصدرها ، والمختارة من افضل المراجع الجامعية والكتب العلمية المبسطة .

وبامكانكم الحصول على اسمائها من الكاتالوجات التى تنشرها الدار باللغات العربية والانجليزية والفرنسية والاسبانية .

عنوان دار « مير » :
الاتحاد السوفييتى — موسكو
بيرفى ريجسكى بيريولوك رقم ٢

صدر عن دار «مير» للطباعة والنشر

«الكوكب البعيد» : تأليف ـ ا . ستروجاتسكى ، ب . ستروجاتسكى

تدور أحداث هذه الرواية العلمية الخيالية فى القرن الثانى والعشرين . فثمة كوكب بعيد يدعى « قوس قزح» اتخذ بمثابة قاعدة لاجراء التجارب الفيزيائية الهائلة . وبعد احدى التجارب حدث فى قطبى الكوكب تفاعل متسلسل اجتاح الكوكب باجمعه ، وكانت وسيلة الانقاذ الوحيدة السفينة الفضائية « تاريبيل الثانى » التى بالكاد تتسع لنقل الاطفال فقط . ويقدم المؤلفان صورة عن انسان المستقبل و مواقفه تجاه العمل والحياة ...

«العمود الجهنمى» : مجموعة قصص علمية خيالية

... عمود رهيب من الدخان ينطلق من اعماق الارض فجأة ، ويلتف حول كوكبنا ... فيتشوش مجال الجذب المغنطيسى والحث الكهربائى ، ويعم العالم هرج ومرج . لكن الانسان لم يعدم حيلة فى ترويضه وتسخير طاقتة لما فيه مصلحة البشر ..

هذا ما تتضمنه قصة « العمود الجهنمى » ، وفى الكتاب مجموعة قصص طريفة ومؤثرة اخرى .

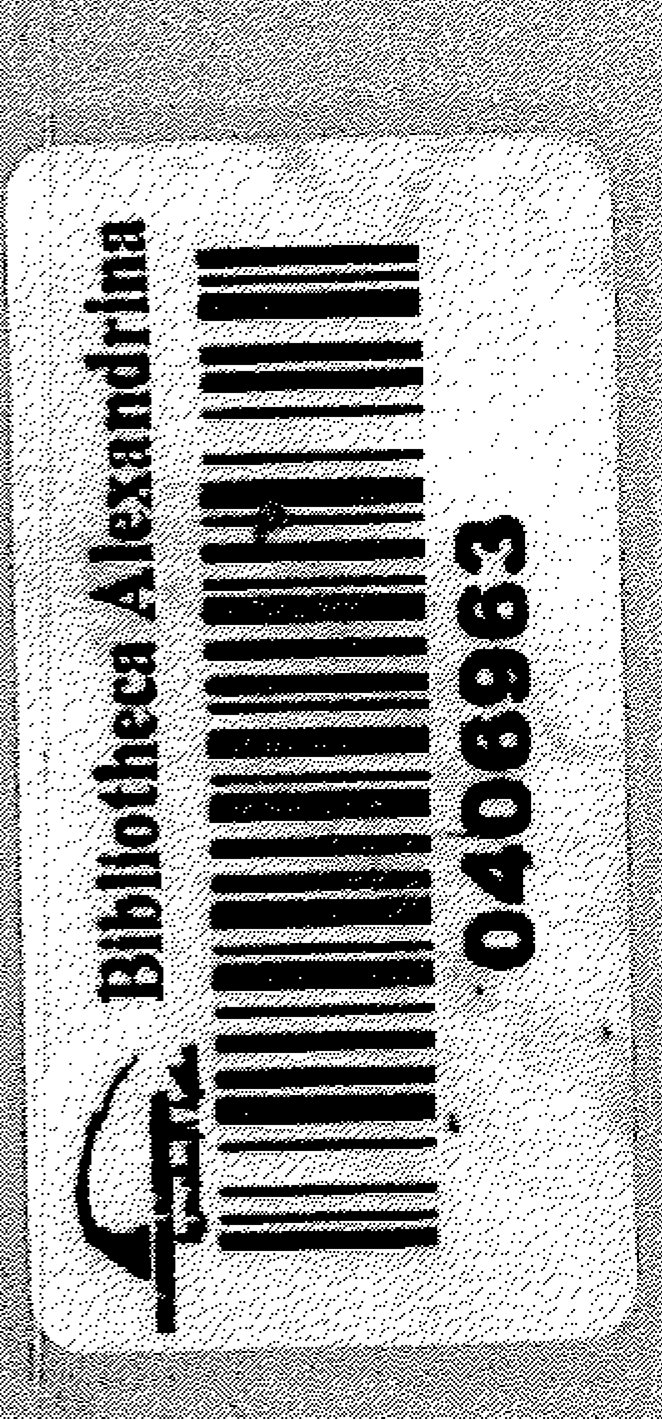
من منشــورات

دار «مير» للطباعة والنشر

الميكانيكا (النظرية)	سيميون تارج
الميتالورجيا العامة	ن . سيفريكوف وآخرين
الكيمياء العضوية	ب . بافلوف ، تيرينتيف
الميكانيكا التحليلية	ف . جانتماخر
الفيزياء الحديثة	ب . ايفانوف
هندسة وصناعة تكرير البترول	ل . ايفانوفا وآخرين

يمكن الحصول على اى من الكتب المذكورة لكبار العلمـــاء والاخصائيين السوفييت من مؤسسة «مجدوناروددنايا كنيجـا» موسكو ٢٠٠ ، او من وكلائها المعتمدين فى البلدان العربية .




Bibliotheca Alexandrina
04069963